

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electrique

THÈME

Calcul des rayonnements électromagnétiques d'un coup de foudre initié à une tour en présence d'un sol stratifié verticalement

Préparé par :

Ayad Wissem, Lassaker lilia sarah

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	
Habri Khaled	MAA	Président
Bekki Ibrahim	MAA	Examinateur
Bedoui Messouda	MCB	Examinatrice
Ghlib Imane	MCB	Encadreur
Omari Mohamed	MCB	Co-Encadreur

PROMOTION 2022 /2023

Résumé

Les effets électromagnétiques de la foudre sont un problème majeur en compatibilité électromagnétique ; ils peuvent perturber ou endommager une vaste gamme de systèmes électriques. Par conséquent, l'évaluation précise des perturbations induites par la foudre nécessite une bonne connaissance des caractéristiques du champ électromagnétique rayonné. Le but de notre travail est l'étude et la caractérisation du rayonnement électromagnétique associé à la phase de l'arc en retour subséquent de foudre. Les champs électromagnétiques sont calculés en utilisant la méthode FDTD qui nous a permis de s'affranchir des hypothèses généralement utilisées dans la littérature pour prendre en compte l'effet de la conductivité électrique du sol. Différents scénarios, qui incluent des géométries et des configurations complexes, sont étudiés, à savoir, coups de foudre initiés à des objets élevés (Tours) en présence d'un sol stratifié vertical. Le code de calcul numérique ainsi développé a été, tout d'abord, validé à l'aide des données publiées dans la littérature. Les résultats obtenus sont très encourageants ; certains confirment ceux publiés dans la littérature et d'autres ouvrent des perspectives dans le domaine.

Mots clés : Compatibilité électromagnétique, FDTD, foudre, rayonnement électromagnétique.

Abstract

The electromagnetic effects of lightning are a major problem in electromagnetic compatibility; they can disrupt or damage a wide range of electrical systems. Therefore, the accurate evaluation of the disturbances induced by lightning requires a good knowledge of the characteristics of the radiated electromagnetic field. The purpose of our work is the study and characterization of the electromagnetic radiation associated with the lightning subsequent return stroke phase. Electromagnetic fields are calculated using the FDTD method which allowed us to overcome the hypotheses generally used in the literature to take into account the effect of the electrical conductivity of the soil. Different scenarios, which include geometries and complex configurations, are studied, namely, lightning strike initiated to high objects (Towers), taking into account the vertical stratification of the soil. The numerical calculation code thus developed was first validated using published data. The obtained results are very encouraging; some confirm those published in the literature and others open perspectives in the field.

Key words: Electromagnetic compatibility, FDTD, lightning, electromagnetic radiation

Remerciement

Avant tous, nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné la Force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous remercions tout particulièrement nos encadreurs Mme GHLIB IMANE et Mr OMARI MOHAMED pour leur supervision et leurs conseils lors de la mise en œuvre de ce projet.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir accepté de faire partie du comité d'évaluation de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui ont contribué à notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous sommes très heureux d'exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à réaliser ce projet et ce mémoire.

Dédicace

A nos chers parents

Table des matières

Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : généralité sur la phénoménologie de la foudre	
I.1 Définition de la foudre	5
I.2 Historique	5
I.3 L'origine de surtensions de la foudre	6
I.4 Les phénomènes précurseurs.....	6
I.4.1 Formation du nuage	6
I.4.2 Formation des charges	6
I.4.3 Répartition des charges	7
I.5 Les caractéristiques électriques de la foudre	7
I.5.1 Types de coup de foudre	7
I.5.2 Le coup de foudre positive	8
I.5.3 Le coup de foudre négatif.....	8
I.5.4 Le coup de foudre descendant	8
I.5.6 Le coup de foudre ascendant	8
I.6. Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés	9
I.6.1. Courant de l'arc en retour.....	9
I.6.2. Données obtenues par déclenchement artificiel de la foudre	9
I.6.3. Données obtenues par l'utilisation des petites tours élevées (moins de 100m).....	12
I.6.4. Données obtenues par l'utilisation des tours élevées (plus de 100m).....	13
A. Compagne de mesures menée en Allemagne	13
B. Compagne de mesures menée à Toronto-Canada	13
1.6.5. Caractérisation des champs électromagnétiques de l'arc en retour en fonction de la distance	16
I.7 Impact de foudre sur le réseau électrique	17
I.7.1 Notions sur le réseau électrique.....	17
I.7.2 Impact de foudre sur les composantes du réseau électrique.....	18
I.8. Effets de la foudre	18
Conclusion	19
Chapitre 2 : Synthèse globale des travaux liés à la mesure des courants et des champs électromagnétiques	
II.1- Introduction.....	21
II.2 Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé	21
II.2.1.- Courant d'arc en retour à la base du canal de foudre	21
II.2.2- Formulations mathématiques du courant associé à un coup de foudre	21
II.2.3. La fonction d'Heidler	21
II.2.4 Classification des Modèles du courant de l'arc en retour	22
II.2.5- Les Modèles d'ingénieur.....	23

1. Modèle de la ligne de transmission modifié avec décroissance linéairement-MTLL...	23
2. Modèle de la ligne de transmission modifié avec décroissance exponentiellement –MTLE...	23
II.4 Modélisation du courant de l’arc en retour dans le canal et le long de l’objet élevé	24
II.4.1-Géométrie du problème	24
II.4.2-Modèle de Rachidi et al	24
II.4.3 - Modèle de Baba et Rakov	25
II.4.4– Circuit équivalent représentant un coup de foudre frappant une tour élevée.....	26
II.5 Calcul de champ électromagnétique généré par l’interaction d’un coup de foudre avec une tour.....	27
II.5.1 Les méthodes numériques en électromagnétisme...	28
1 Méthode des volumes finis	28
2 Méthode des éléments finis	28
3 Méthode des différences finis	28
II.5.2 La méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD)	28
II.5.2.1. Présentation de la méthode FDTD.....	29
II.5.2.2 Principe de base de la méthode FDTD	29
II.6 Conditions aux limites absorbantes (absorbing bondary condition)	31
Conclusion	32
Chapitre 3 : résultat et analyse	
III.1 Introduction.....	35
III.2 application de la méthode FDTD pour le calcul du champ electromagnetiques de la foudre.....	35
III 2.1 coup de foudre tombent sur la tour peissenberg. . .	35
III2.1.1 Champs électromagnétiques au-dessus du sol.....	36
III 2.1.2 Champs électromagnétiques souterrains.....	41
III 2.2 coup de foudre tombent sur la tour CN. . .	46
III2.2.1 Champs électromagnétiques au-dessus du sol.....	47
III2.2.2 Champs électromagnétiques souterrains.....	49
Conclusion	51
Conclusion générale	54
Bibliographi	

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Décharge électrique. [1].....	5
Figure I.2 : Indication illustrative de la distribution de la charge électrique à l'intérieur et autour d'un nuage orageux	7
Figure I.3 Les quatre types de coup de foudre nuage-sol [5]	9
Figure I.4 Lanceurs et fusées utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre (a) lanceur fixe, (b) lanceur mobile et (c) fusées. [9].....	10
Figure I.5 Séquence d'évènements d'un déclenchement artificiel de foudre. [10]	10
Figure I.6 Eclaires déclenchés en utilisant la technique de déclenchement artificiel à Camp Blanding, en Floride [11].....	11
Figure I.7 Formes d'ondes normalisées du courant d'arc en retour typique (A) Premier arc, (B) arc en retour subséquent. [14].....	12
Figure I.8 (a) Tour de Peissenberg et (b) courant de foudre enregistré au sommet et à la base de la tour de Peissenberg (adapté d' Heidler [15])	13
Figure I.9 Mesure du courant de l'arc en retour à l'aide de la tour CN au Canada [9].....	14
Figure I.10 Champ électrique vertical (colonne gauche) et champ magnétique azimutal (colonne droite) pour le premier arc en retour (ligne continue) et l'arc en retour subséquent (ligne pointillée) à des distances de 1 à 200 km [18]	15
Figure I.11 : Vue d'ensemble des composantes du réseau électrique.[20].....	16
Figure I.12 : Impact de foudre sur les éoliennes [21], et le réseau électrique [22]	17

Chapitre II

Figure II.1 : Premier arc en retour subséquent à la base du canal.....	22
Figure II.2 : La distribution temporelle du courant de l'arc en retour subséquent pour le modèle MTLL [16].....	23
Figure II.3 : La distribution temporelle du courant de l'arc en retour subséquent pour le modèle MTLE [16].....	23
Figure II.4 : Géométrie du problème dans le cas du calcul du champ électromagnétique en dessous du sol. [42]	24
Figure II.5 - Schéma électrique équivalent au modèle de Baba et Rakov [20].....	25
Figure II.6 : courant à la base et au sommet de la tour peissenberg.....	26
Figure II.7 : courant à la base et au sommet de la tour CN.....	26

Figure II.8 : Géométrie du problème dans le cas du calcul du champ électromagnétique en dessous du sol. [42]	27
Figure II.9 Principe de la discrétisation temporelle. [27].....	29
Figure II.10 - Maillage spatial en coordonnées cylindriques	30
Figure II.11 Domaine de calcul en (2D) avec un système à coordonnées cylindriques. [27].	30

Chapitre III

Figure III. 1 : Géométrie du problème.(la tour peissenberg)	34
Figure III.2 :champ électrique horizontal à $r=150$ et $h=10$;.....	35
Figure III. 3 :champ électrique vertical à $r=150$ et $h=10$	36
Figure III. 4 :champ magnétique azimuthal à $r=150$ et $h=10$	36
Figure III. 5 :champ électrique horizontal à $r=198$ et $h=10$	37
Figure III. 6 :champ électrique vertical à $r=198$ et $h=10$	37
Figure III. 7 :champ magnétique azimuthal à $r=198$ et $h=10$	37
Figure III. 8 :champ électrique horizontal à $r=250$ et $h=10$	38
Figure III. 9 :champ électrique vertical à $r=250$ et $h=10$	39
Figure III. 10 :champ magnétique azimuthal à $r=250$ et $h=10$	39
Figure III.11 :champ électrique horizontal à $r=150$ et $p=1m$	40
Figure III.12 :champ électrique vertical à $r=150$ et $p=1m$	40
Figure III.13 :champ magnétique azimuthal à $r=150m$ et $p=1m$	41
Figure III.14 Champ électrique horizontal à $r = 198m$ et $p = 1m$	41
Figure III.15 Champ électrique horizontal à $r = 250m$ et $p = 1m$	42
Figure III.16 Champ électrique vertical à $r = 198m$ et $p = 1m$	42
Figure III.17 Champ électrique vertical à $r = 250m$ et $p = 1m$	43
Figure III.18 Champ magnétique azimuthal à $r = 198m$ et $p = 1m$	43
Figure III.19 Champ magnétique azimuthal à $r = 250m$ et $p = 1m$	44
Figure III.20 : Géométrie de problème (la Tour CN).....	45
Figure III.21 : Le champ électrique horizontal à $r = 198m$ et $h = 10m$	46
Figure III.22 : Le champ électrique vertical à $r = 198m$ et $h = 10m$	46
Figure III.23 : champ magnétique azimuthal à $r = 198 m$ et $h = 10 m$	46
Figure III.24 : Le champ électrique horizontal à $r = 198m$ et $p = 1m$	47
Figure III.25 : Le champ électrique vertical à $r = 198m$ et $p = 1m$	48
Figure III.26 : Le champ magnétique azimuthal à $r = 198m$ et $p = 1m$	48

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Caractérisation du pic de courant de l'arc en retour et de sa dérivée	12
Tableau II.1 : Les paramètres des deux fonctions d'Heidler... ..	21
Tableau II.2 : Les paramètres des deux tours	25
Tableau III.1 : les paramètres électriques pour les 02 couches	35
Tableau III.2 : les paramètres électriques pour les 02 couches	45

Glossaire :

CEM : La compatibilité électromagnétique.

FDTD : La méthode des différences finies dans le domaine temporel.

FDFD : La méthode des différences finies dans le domaine fréquentiel.

FEM : La méthode des éléments finis.

MOM : La méthode des moments.

ABC : Absorbing Boundary Conditions (conditions aux limites absorbantes).

LEMP : L'impulsion électromagnétique de la foudre.

NALDN : North American Lightning Detection Network.

NLDN : National Lightning Detection Network (USA).

BG : Modèle de Bruce et Golde.

TCS : Travling Current Source Model (modèle de source du courant mobile).

DU : Modèle de Diendorfer et Uman.

TL : Modèle de ligne de transmission.

MTL : Modèle de ligne de transmission modifiée.

MTLL : Modèle de ligne de transmission modifiée avec une décroissance linéaire.

MTLE : Modèle de ligne de transmission modifiée avec une décroissance exponentielle.

E_r : Champ électrique horizontal.

E_z : Champ électrique vertical.

H_ϕ : Champ magnétique azimutal.

C : Vitesse de la lumière dans le vide exprimée en mètres par seconde.

v : Vitesse de l'arc en retour subséquent de la foudre en mètre par seconde.

ϵ : Permittivité du vide.

ϵ_r : Permittivité relative du matériau.

μ_0 : Perméabilité du vide.

μ_r : Perméabilité relative du matériau.

σ : Conductivité électrique

r : Vecteur position selon l'axe horizontal (x).

z : Vecteur position selon l'axe vertical (Z).

H : Hauteur du canal de la foudre.

h : Hauteur de la tour.

Z' : Indique la position d'un point le long du canal de la foudre ($0 \leq h \leq H$).

λ : La constante de décroissance du courant

u : La fonction d'Heaviside.

$P(z')$: Le facteur d'atténuation du courant dépendant de la hauteur.

I_0 : L'amplitude du courant à la base du canal.

τ_1 : Le temps de montée de l'impulsion du courant.

τ_2 : La durée de l'impulsion du courant.

η : Le facteur de correction d'amplitude du courant.

n : représente le nombre de réflexions aux deux extrémités de la tour.

Z_t : L'impédance caractéristique de la tour.

Z_{ch} : L'impédance caractéristique du canal de la foudre.

Z_g : L'impédance du sol.

ρ_t : Coefficient de réflexion au sommet de la tour.

ρ_g : Coefficient de réflexion à la base de la tour.

δ : Epaisseur de peau.

Δr : Le pas temporel selon l'axe (x).

Δz : Le pas temporel selon l'axe (z).

Δt : Le pas temporel.

i : L'incrément dans l'espace selon l'axe (x).

j : L'incrément dans l'espace selon l'axe (Z).

n : L'incrément dans le temps

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis les débuts des communications radio et télégraphiques, on sait qu'un éclateur génère des ondes électromagnétiques riches en contenu spectral (composantes fréquentielles) et que ces ondes peuvent provoquer des interférences ou du bruit dans divers appareils électroniques et électriques tels que les récepteurs radio et les téléphones communication. De nombreuses autres sources d'émissions électromagnétiques telles que la foudre, les relais, les moteurs électriques à courant continu et les lampes fluorescentes génèrent également des ondes électromagnétiques riches en contenu spectral et peuvent provoquer des interférences dans ces appareils. Les lignes de transport d'électricité à haute tension génèrent des émissions électromagnétiques à la fréquence industrielle [60 Hz ; 50 Hz en Europe].

L'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électriques et/ou électroniques peut provoquer leur dysfonctionnement et avoir des conséquences dangereuses mettant parfois en cause la sécurité des personnes. C'est pourquoi, il existe depuis longtemps une branche de l'ingénierie qui porte sur la conception des systèmes et leurs analyses, de sorte que, ces systèmes se doivent être compatibles avec leur environnement électromagnétique. La validation de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes, qui accompagne les phases de conception et de développement, est basée sur l'application de normes bien définies.

D'après la Norme VEI 161-01-07, la compatibilité électromagnétique est définie comme l'Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique, de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. Le terme de CEM désigne aussi l'ensemble des techniques qui traitent toutes les perturbations électromagnétiques ainsi que les moyens permettant d'éviter les effets indésirables qu'elles sont susceptibles de provoquer.

La nature est la mère de tous les mystères, et l'un des plus captivants est la foudre. Cette merveille naturelle intrigue les humains depuis des siècles, sa puissance et son imprévisibilité en font un sujet d'étude fascinant. Les chercheurs s'efforcent d'exploiter son énergie depuis des décennies. La foudre est un flash lumineux scintillant qui se produit lorsque de l'électricité statique est soudainement déchargée dans une ou plusieurs régions chargées de l'atmosphère. Elle peut se produire dans un seul nuage, entre différents nuages ou entre les nuages et l'atmosphère ou le sol.

La foudre est l'un des phénomènes naturels les plus puissants qui se produisent sur terre, et elle peut être nocive pour tous les appareils sur les toits et/ou les zones extérieures, comme la détérioration des systèmes photovoltaïques et des éoliennes où il est nécessaire pour fournir des structures efficaces de protection contre la foudre. En outre, l'occurrence de la foudre peut entraîner la mort de personnes et endommager les appareils électriques et l'environnement. Des milliers de blessures produites par la foudre ont été signalées depuis le début de l'humanité, entraînant des décès et des dommages aux humains avec des conséquences à la fois aiguës et à long terme.

Introduction générale

Les champs électromagnétiques de la foudre induit dans les grandes boucles de masse des tensions qui se compte en kilovolts, ces surtensions peuvent détruire les équipements de voisinage. Lors d'un coup de foudre ; des dysfonctionnements dans des systèmes électronique ou électronique ont été observés à des distances pouvant atteindre 1 km. De plus, les impacts indirects des coups de foudre constituent une cause plus importante que les impacts directs.

L'objectif de ce mémoire est de calculer les rayonnements électromagnétiques générés par l'interaction de la foudre avec des tours (Canadian National Tower dite la tour CN 553 m, et la tour Peissenberg en Allemagne, en présence d'un sol stratifié verticalement. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) a été utilisée pour la résolution numérique des équations de Maxwell.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur le phénomène de la foudre ainsi que ses effets et bien que les moyennes de protection contre cette dernière.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation, en commençant par la modélisation de courant à la base du canal de la foudre, modélisation du courant en présence des tours, et nous terminons par la modélisation des rayonnements électromagnétiques associés.
- Le troisième chapitre est réservé à l'analyse des résultats obtenus par la simulation des différentes géométries adoptées.

Chapitre I :

Généralités sur la phénoménologie de la foudre

I.1 Définition de la foudre :

La foudre est un phénomène naturel, une décharge électrique (figure I.1) qui se produit à partir des nuages orageux (cumulonimbus), à l'intérieur d'un nuage, entre nuages ou entre le nuage et le sol. Elle peut engendrer des sérieux dégâts lorsqu'elle frappe des constructions ou des êtres vivants.



Figure I.1 : Décharge électrique. [1]

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle d'air dont les électrodes sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre. Elle reste scientifiquement assez mal connue car étant brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Dans les grands laboratoires, on provoque le coup de foudre par le lancement d'une fusée, reliée par un fil à la terre.

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une surtension considérable.

I.2. Historique :

Depuis longue temps de l'humanité, l'homme a été terrorisé et fasciné par la foudre et le tonnerre. Pour expliquer ces phénomènes et pour conjurer le danger, il faisait appel à des divinités. La foudre était associée à la colère des dieux et à la notion de châtement pour les fautes ou les péchés. On retrouve ces représentations primitives chez tous les peuples et dans toutes les religions de la terre, y compris chez les chrétiens du Moyen Age [2].

Ce n'est qu'au 17^{ème} siècle que l'homme commence à se dégager de ces superstitions, et c'est au 18^{ème} siècle que l'on peut dater les débuts de la connaissance proprement

scientifique de la foudre. Celle-ci coïncide avec la formidable épopée des travaux de Franklin, Nollet, Dalibard et d'autres savants, au cours de laquelle la nature électrique de la foudre fut identifiée, grâce notamment aux expériences du cerf-volant et de la tige de Marly [2].

Le 19ème siècle fut principalement consacré à la collecte d'observations visuelles et statistiques de foudroiements, faute d'une instrumentation adéquate pour pouvoir véritablement progresser. Au cours du premier tiers du 20ème siècle cependant, disons jusqu'en 1930, divers dispositifs de mesure et d'observation photographique avaient déjà permis de défricher un peu la phénoménologie de l'électricité atmosphérique, et de rassembler quelques données numériques. Depuis le milieu du 20ème siècle à aujourd'hui, le développement des réseaux de transport et de distribution d'énergie, de l'informatique et de l'électronique motive sérieusement la recherche en matière de protection contre la foudre et donc sur le phénomène lui-même [2].

I.3 L'origine de surtensions de la foudre

La foudre sur les lignes aériennes : en tombant sur la ligne, la foudre crée une onde de courant de plusieurs milliers d'ampères qui provoque une surtension sur les appareils raccordés à la ligne.

La foudre sur la terre : en tombant sur le sol, la foudre provoque une remontée de potentiel électrique de la terre qui entraîne des surtensions dans les câbles souterrains et les prises de terre.

La foudre par rayonnement : Le champ électromagnétique créé par la foudre (plusieurs milliers de Volts par mètre à plus d'un kilomètre de son point d'impact) crée des surtensions sur les systèmes électriques et les équipements électronique qui sont à plusieurs kilomètres autour du point d'impact. [2]

I.4 Les phénomènes précurseurs :

I.4.1 Formation du nuage :

Le nuage orageux est généralement du type Cumulo-nimbus (forme d'enclume, à base de couleur sombre). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure où il fait plus froid est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure. Ces dernières se chargent négativement tandis que les particules de glace prennent une charge positive.

I.4.2 Formation des charges :

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les microparticules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques préliminaires par frottement.

I.4.3 Répartition des charges :

Les microparticules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage.

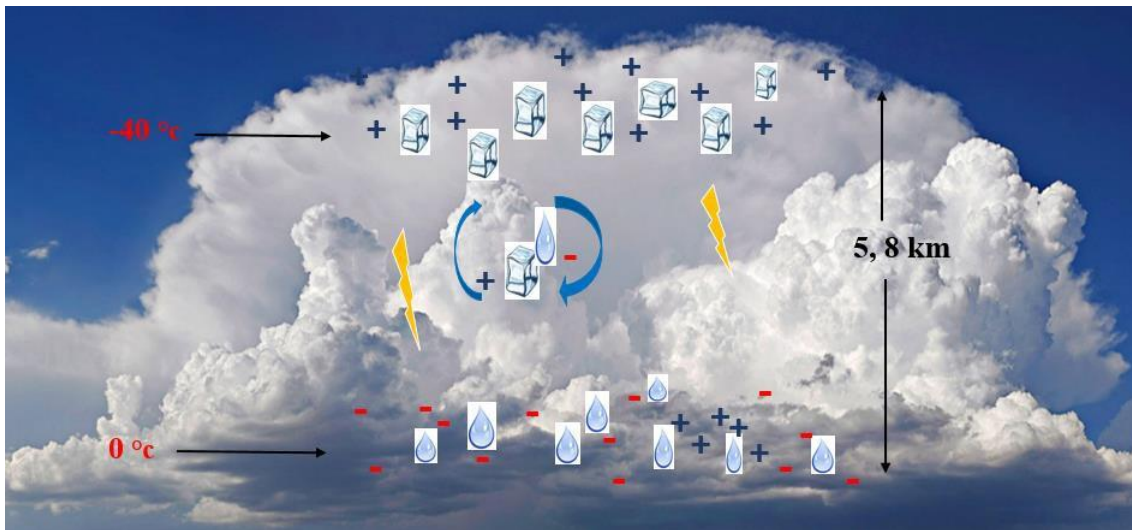


Figure I.2 : Indication illustrative de la distribution de la charge électrique à l'intérieur et autour d'un nuage orageux.

I.5 Les caractéristiques électriques de la foudre

I.5.1 Types de coup de foudre :

La première phase d'un coup de foudre est toujours une pré-décharge peu lumineuse, ou traceur, qui progresse à travers l'air avec une vitesse relativement faible. Ce pré-décharge à son origine, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol, et progresse vers le nuage.

On classe donc tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (ou leader) :

- Les coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage vers le sol).
- Les coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol vers le nuage).

Le coup de foudre le plus fréquent, est descendant. Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, la présence d'une structure élevée est importante, telle qu'une tour élevée ; c'est aussi la raison pour laquelle le coup ascendant se produit plus fréquemment en montagne.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon le sens d'écoulement du courant principal. Conventionnellement, on définira [3] :

I.5.2 Le coup de foudre positive :

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant de 0,1 à 0,2 s. La durée d'impulsion varie entre 20 μ s et 50 μ s et l'amplitude du courant des coups positifs est généralement supérieure à celle des coups de foudre négatifs [4].

I.5.3 Le coup de foudre négatif :

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15 μ s succèdent des impulsions de décharge plus raides et de descentes plus douces [4].

I.5.4 Le coup de foudre descendant :

Caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, c'est le plus fréquent. Il comporte une phase initiale où une pré-décharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur). A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement le champ au sol. Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité [4].

I.5.6 Le coup de foudre ascendant :

Il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas de pylônes de grande hauteur ou d'une tour, l'effet couronne peut créer une décharge, partant du sol qui va se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges accumulées dans le nuage vont bien s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent en zone de montage [4].

Le traceur est un processus qui précède l'arc en retour. Il crée un chemin conducteur entre la charge du nuage et le sol. Selon les observations expérimentales et les statistiques faites par plusieurs chercheurs à travers le monde, les décharges descendantes négatives, type (a), représentent environ 90% des décharges nuage-sol, et qu'environ 10% des éclairs nuage-sol sont des décharges descendantes positives, type (c). Les décharges de foudre ascendantes, types (b) et (d), se produisent uniquement à partir d'objets élevés (plus de 100 m environ) ou d'objets de hauteur modérée situés sur les sommets des montagnes.

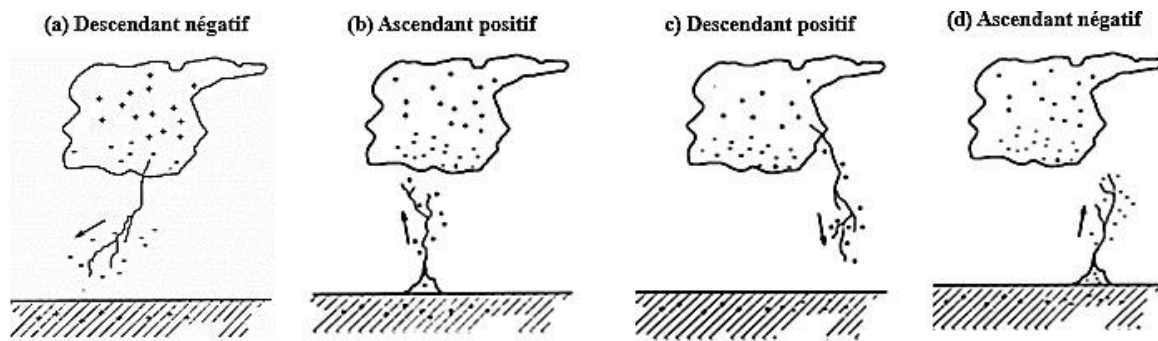


Figure I.3 Les quatre types de coup de foudre nuage-sol [5].

I.6. Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés

I.6.1. Courant de l'arc en retour

Les paramètres de foudre traditionnels nécessaires dans les applications d'ingénierie comprennent l'amplitude du courant, le maximum de la dérivée du courant, le taux moyen d'augmentation du courant, le temps de montée, la durée de l'impulsion, le transfert de charge, etc. Les données de ces paramètres, actuellement adoptées par la plupart des normes de protection contre la foudre, sont basées sur des mesures effectuées par *Berger* et ses collaborateurs en Suisse [5]. Des mesures de courant sur des tours instrumentées ont été faites aussi en Russie, en Afrique du Sud, au Canada, en Allemagne, au Brésil, au Japon et en Autriche. Des résultats importants des études brésilienne, japonaise et autrichienne ont été publiés au cours de ces derniers 20 ans. On passera en revues, par la suite, ces résultats. D'autres mesures de courant récentes sont également considérées.

Pour mesurer directement le courant de l'arc en retour à la base du canal, la connaissance du point d'impact de la foudre est nécessaire. Les techniques utilisées pour l'obtention des données expérimentales sont :

- a). Déclenchement artificiel de la foudre
- b). Utilisation des tours instrumentées

Dans les deux techniques, l'idée principale est d'augmenter la probabilité des impacts de la foudre aux points prédéfinis.

I.6.2. Données obtenues par déclenchement artificiel de la foudre

Schoene et al. [6] ont présenté une analyse statistique des principales caractéristiques des formes d'onde de courant pour 206 arcs en retour dans 46 éclairs déclenchés par des fusées. Les éclairs ont été déclenchés au cours d'une variété d'expériences liées à l'interaction de la foudre avec des lignes électriques qui ont été menées entre 1999 et 2004 à *Camp*

Blanding, en Floride. Le pic moyen du courant de l'arc en retour a été trouvé à 12 kA. Ce qui est cohérent avec ce qui a été rapporté par d'autres études de déclenchement artificiel de la foudre (voir [7]). De plus, il a été constaté que ce paramètre n'était pas influencé par la géométrie de l'objet de déclenchement (la fusée ou le fil) ni par la mise à la terre, comme rapporté précédemment par *Rakov* et al. [8].

La technique la plus efficace pour déclencher la foudre implique le lancement, en direction du nuage orageux, d'une petite fusée traînant derrière elle un fil métallique mince relié à la terre. Cette méthode est généralement appelée déclenchement classique et est illustrée sur les figures I.4 et I.5. Pour décider quand lancer une fusée de déclenchement, la charge de nuage est détectée indirectement en mesurant le champ électrique au sol. En Floride, Les valeurs de champ de 4-10 kV/m sont généralement de bons indicateurs de conditions favorables pour l'initiation de la foudre négative.

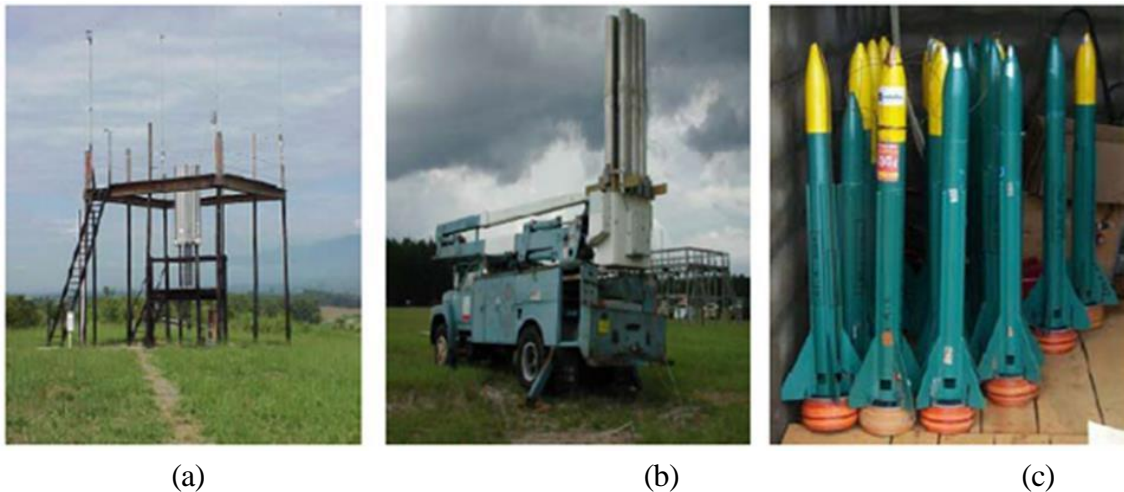


Figure I.4 Lanceurs et fusées utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre

(a) lanceur fixe, (b) lanceur mobile et (c) fusées. [9]

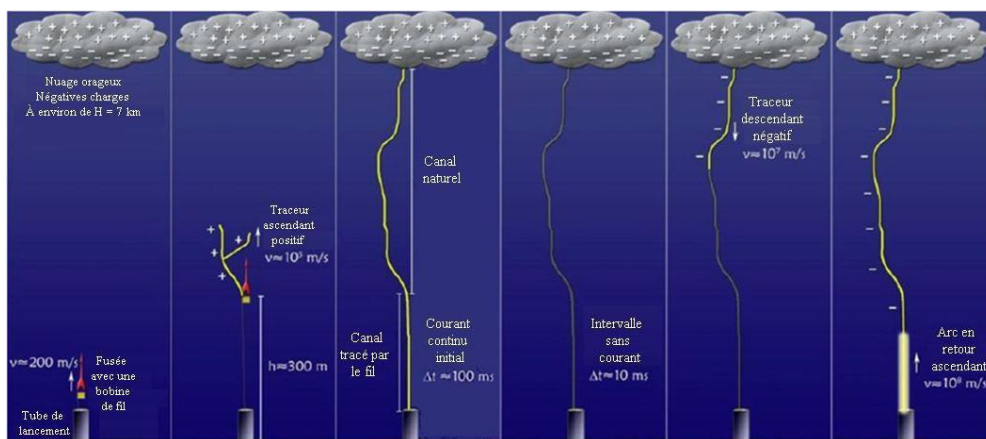


Figure I.5 Séquence d'évènements d'un déclenchement artificiel de foudre. [10]

Lorsque la fusée, lancée vers le nuage orageux, est d'environ 200 à 300 m de hauteur, l'amélioration du champ près de la pointe de la fusée initie un leader chargé positivement qui

se propage vers le nuage. Ce traceur (leader) positif ascendant comble le vide entre le nuage et le sol, et établit un courant continu initial d'une durée de quelques centaines de millisecondes qui transporte la charge négative de la région de la source des charges vers l'installation de déclenchement. Les traceurs obscurs et les arcs en retour subséquents dans la foudre déclenchée artificiellement sont similaires aux séquences des traceurs obscurs/arcs en retour dans la foudre naturelle, bien que les processus initiaux dans les deux cas sont clairement différents.

À ce jour, plus de 1000 décharges de foudre ont été déclenchées par des chercheurs de différents pays utilisant la technique de la fusée et du fil, dont plus de 450 au Centre international de recherche et d'essais sur la foudre (ICLRT) à Camp Blanding, en Floride (La ICLRT a été créée en 1993). Les photographies de deux éclairs classiques déclenchés artificiellement au Camp Blanding sont montrées sur la Figure I.6 [11].



Figure I.6 Eclairs déclenchés en utilisant la technique de déclenchement artificiel à Camp Blanding, en Floride [11]

Cependant, il faut être conscient des différences entre certaines propriétés de la foudre artificielle et celles de son équivalent naturel. La foudre déclenchée artificiellement se produit généralement dans des conditions nuageuses sous lesquelles la décharge a peu de chance de se déclencher indépendamment. Par conséquent, la partie inférieure du canal de foudre est contaminée par des résidus de fil métallique. De plus, le canal se termine par une installation ayant des caractéristiques géométriques et électriques spécifiques. Il a été rapporté que les éclairs déclenchés artificiellement diffèrent des éclairs naturels, en ce qu'ils présentent un plus grand nombre de coups par flash, une vitesse de traceur obscur (dart leader) plus élevée et une durée d'intervalle inter-flash plus courte.

Tableau I. 1. Caractérisation du pic de courant de l'arc en retour et de sa dérivée [12]

L'endroit	L'année	Nombre d'évènement	Valeur moyenne du pic du courant (KA)	Valeur moyenne du pic de la dérivée du courant (KA/ μ s)
Floride	1985-1991	305/134	12.1	91.4
France	1986, 1990-1991	54/47	9.8	36.8

Comme la montre le Tableau I.1, les valeurs moyennes du courant sont respectivement de 12,1 et 9,8 kA aux États-Unis et en France. Ces valeurs médianes diffèrent d'environ 20%. On note une similitude entre la valeur moyenne du pic du courant mesurée en Floride et celle rapportée par *Berger* [5].

Les résultats obtenus par déclenchement artificiel ont fourni un aperçu considérable sur les processus de la foudre qui n'auraient pas été possibles à partir des études de la foudre naturelle en raison de son occurrence aléatoire sur le plan spatial et temporel.

I.6.3. Données obtenues par l'utilisation des petites tours élevées (moins de 100m)

La description la plus complète du courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre est donnée par l'équipe du Professeur *Berger* (rapporté par *Uman* [13]) durant les années 1950-1980. Cette caractérisation est basée sur des oscillogrammes des courants mesurés à l'aide des shunts résistifs installés au sommet de deux tours de 70m de hauteur au sommet de la montagne San Salvatore à Lugano, en Suisse d'altitude 915m au-dessus du niveau de la mer. La hauteur effective de chaque tour a été estimée par *Eriksson* à 350 m. En conséquence, environ 15% des mesures rapportées par l'équipe du Prof. *Berger* sont dues à des traceurs descendants. La plupart des décharges sont initiées par des traceurs ascendants positifs et négatifs. [14]

La figure I.7 illustre les formes moyennes des courants typiques correspondant aux arcs en retour premier et subséquent d'une décharge négative. Dans cette figure, La partie montante de la forme d'onde de premier arc est caractérisé par une forme concave, la partie initiale plus lente étant probablement due au processus d'attachement. Il est possible de voir un temps de montée rapide du courant correspondant à l'arc en retour subséquent. La distribution statistique des principaux paramètres du courant est présentée dans le tableau I.2.

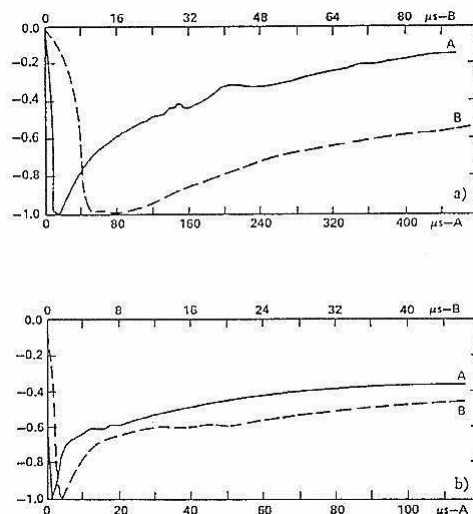


Figure I.7 Formes d'ondes normalisées du courant d'arc en retour typique(A) Premier arc, (B) arc en retour subséquent. [14]

La caractérisation des données de *Berger*, présentées sur la figure I.7 et dans le tableau I.2, nous permet d'extraire les observations suivantes pour les flashes descendants :

- A. L'amplitude du courant du premier arc en retour est supérieure à celle du courant de l'arc en retour subséquent.
- B. La valeur maximale de la variation du courant, di/dt , dans le cas d'un arc subséquent est supérieure à celle du premier arc en retour
- C. Le temps de montée du courant de l'arc en retour subséquent est plus rapide que celui d'un courant du premier arc en retour.
- D. La durée de la valeur maximale (2 kA à crête) est plus courte dans les courants de l'arc en retour subséquent négatif que dans les courants du premier arc en retour négatif.
- E. La durée du flash du courant d'arc en retour subséquent négatif est plus courte que celle de premier arc en retour négatif

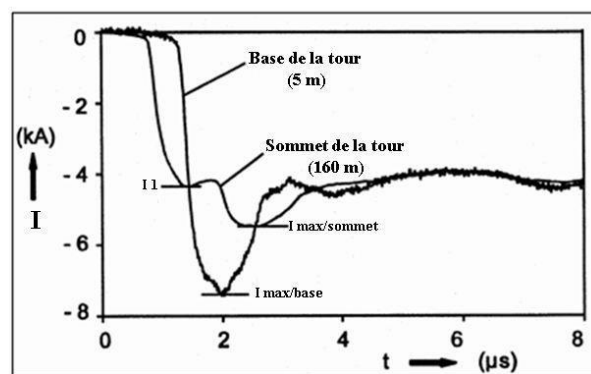
I.6.4. Données obtenues par l'utilisation des tours élevées (plus de 100m)

A. Compagne de mesures menée en Allemagne :

La tour de Peissenberg, 168 m de hauteur, située à 250 m au-dessus du sol et 950 m au-dessus du niveau de la mer, près de Munich en Allemagne, a été utilisée de 1978 à 1999 pour étudier les courants de foudre et les champs électromagnétiques associés [15]. La tour avait deux systèmes de mesure du courant installés, respectivement, à environ 160 m et 5 m par rapport au sol.



(a)



(b)

Figure I.8 (a) Tour de Peissenberg et (b) courant de foudre enregistré au sommet et à la base de la tour de Peissenberg (adapté d' Heidler [15]).

Les systèmes ont été capables de mesurer les courants de retour et leurs dérivées. Pendant la période d'exploitation de la tour, un seul coup de foudre négatif (éclair nuage-sol) a été enregistré par le système. La majorité des coups enregistrés ont été produits par des éclairs ascendants, avec une polarité négative ou positive. La figure I.8 (a) montre une photographie de la tour de Peissenberg et la figure I.8 (b) présente des formes d'onde de courant de l'arc en retour mesurées simultanément à la base et au sommet de la tour dans lesquelles la «Contamination» du courant par des réflexions multiples est clairement observée.

B. Compagne de mesures menée à Toronto-Canada :

Depuis 1978 ([16]-[17]) des groupes de chercheurs ont mené des mesures de courant de foudre sur une tour instrumentée située à Toronto au Canada, de hauteur 553m. Les données du courant sont obtenues grâce à deux bobines « Rogowski » inductives placées sur la tour à 509 et 474m au-dessus du sol. La figure I.9 montre l'emplacement des capteurs de courant sur la tour.

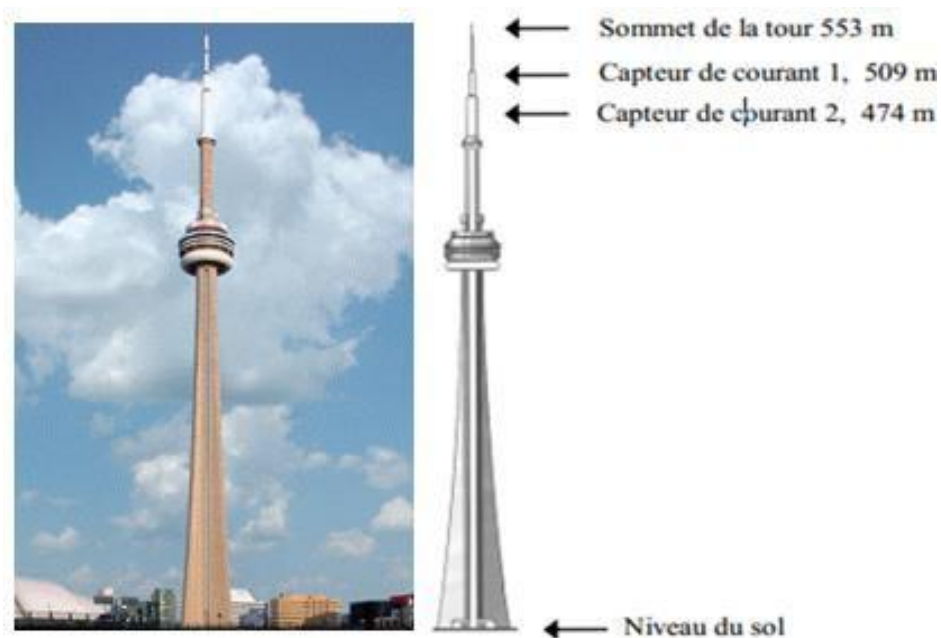


Figure I.9 Mesure du courant de l'arc en retour à l'aide de la tour CN au Canada [9]

1.6.5. Caractérisation des champs électromagnétiques de l'arc en retour en fonction de la distance

Les formes d'ondes typiques du champ électrique vertical et du champ magnétique azimutal à des distances de 1 à 200 km pour les premiers arcs en retour et les arcs en retour subséquents ont été publiées par *Lin et al.* [18] en 1979. Ces résultats ont été basés sur de nombreuses mesures effectuées en Floride (figure I.10).

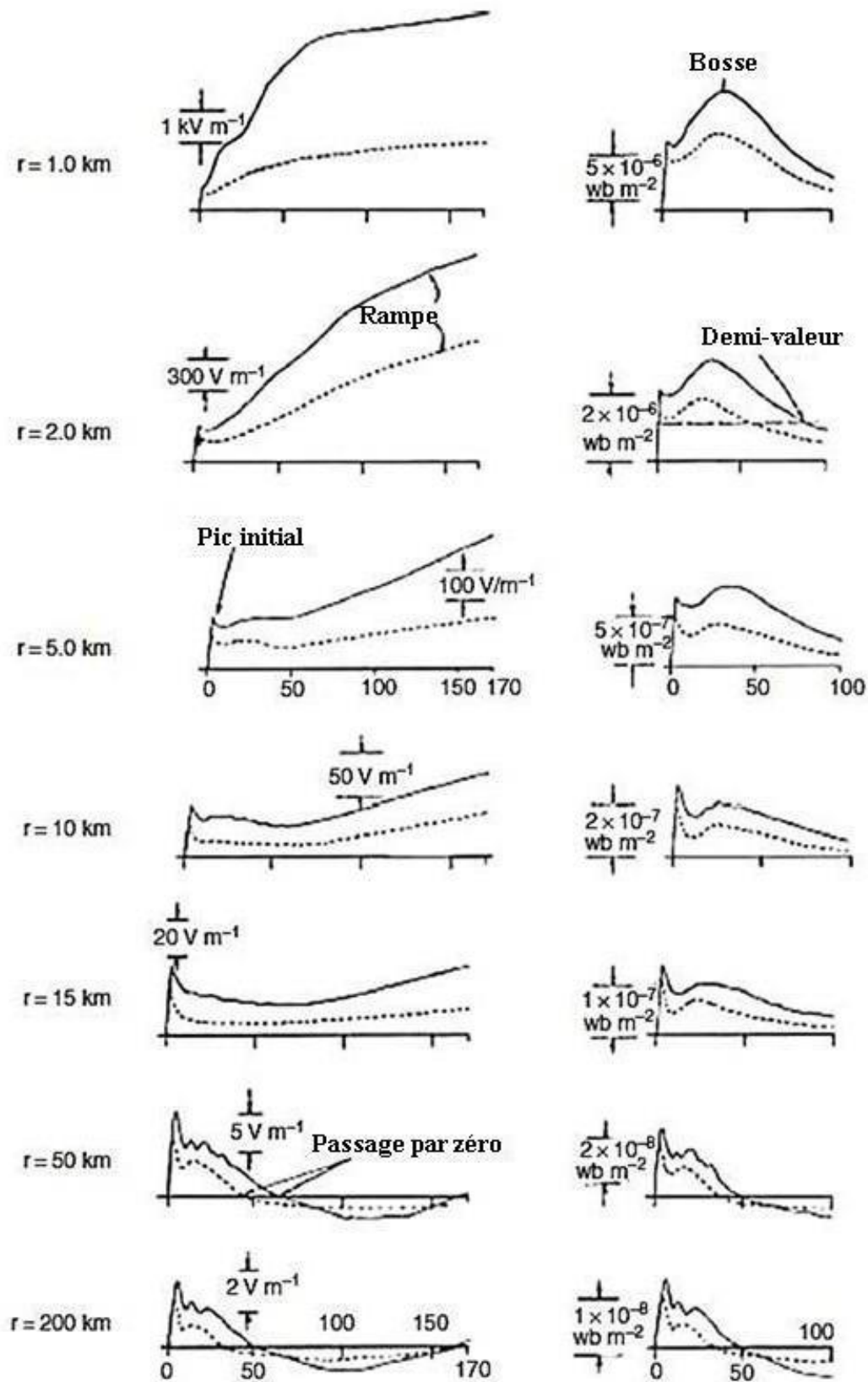


Figure I.10 Champ électrique vertical (colonne gauche) et champ magnétique azimuthal (colonne droite) pour le premier arc en retour (ligne continue) et l'arc en retour subséquent (ligne pointillée) à des distances de 1 à 200 km [18]

Quatre caractéristiques du champ électromagnétique ont été identifiées par *Nucci et al.* [19] :

1. Le champ électromagnétique présente pour toute distance (entre 1 km et 200 km) un premier pic dont l'intensité est approximativement inversement proportionnelle à la distance ;
2. La croissance en rampe, du champ électrique après son pic initial et cela pour des distances proches ;
3. La bosse que présente l'allure du champ magnétique à des distances proches. Cette bosse apparaît après un pic initial dans l'intervalle [10µs, 40µs] ;
4. Les allures du champ électrique et magnétique lointains qui présentent une inversion de polarité.

I.6 Impact de foudre sur le réseau électrique :

I.6.1 Notions sur le réseau électrique :

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs. L'énergie électrique peut être produite non seulement à partir de sources traditionnelles telles que les combustibles fossiles et la fission nucléaire, mais aussi des sources renouvelables comme l'hydraulique, le vent, le soleil, la biomasse, ... Le réseau électrique a pour mission de connecter les centres de production et les consommateurs d'électricité.

Le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension : le réseau de transport et de répartition à très haute et à haute tension, auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée, et le réseau de distribution à moyenne et à basse tension alimentant les consommateurs. Entre les lieux de production et les zones de consommation, les réseaux de transport, de répartition et de distribution sont composés de lignes électriques de différentes tensions. Les postes électriques connectent les réseaux entre eux et transforment les tensions. Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs.

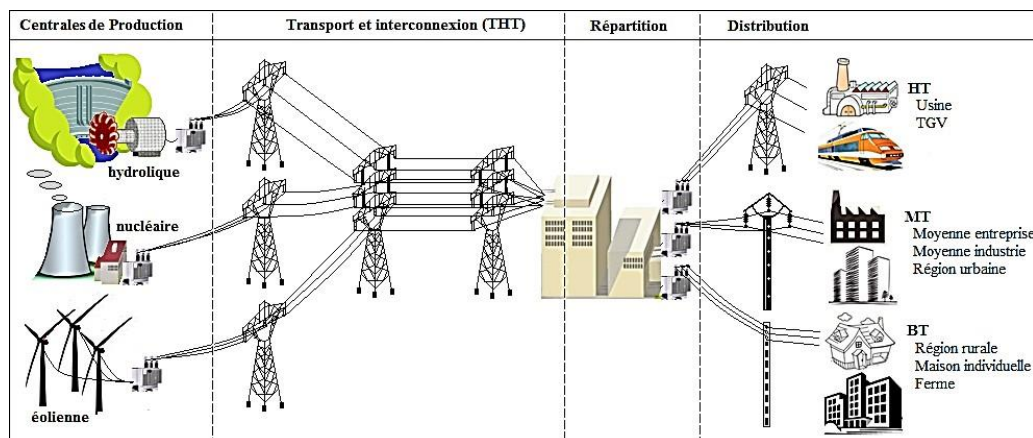


Figure I.11 : Vue d'ensemble des composants du réseau électrique. [20]

I.7. Impact de foudre sur les composantes du réseau électrique :

Par son étendue, le réseau de transport d'énergie électrique est soumis à diverses sources de perturbations électromagnétiques d'origine artificielle ou naturelle telle que la foudre. Généralement, les lignes de transport d'énergie et les pylônes électriques sont les plus exposées, les éoliennes de par ses hauteurs subissent eux aussi les effets de la foudre.



Figure I.12 : Impact de foudre sur les éoliennes [21], et le réseau électrique [22].

I.8.1 Effets de la foudre :

Les effets de la foudre sont ceux d'un courant d'impulsion à haute résistance qui se propage initialement dans un milieu gazeux (l'atmosphère), puis dans un milieu solide plus ou moins conducteur (exemple : la terre) :

- Effets visuels (flash) ;
- Effets acoustiques (tonnerre) ;
- Effet thermique : la chaleur générée par effet Joule dans le canal de foudre ;
- Effets électrodynamiques : ce sont les forces mécaniques appliquées aux conducteurs placés dans un champ magnétique créé par la circulation à haute tension. Ils peuvent entraîner des déformations ;
- Les effets sur un être vivant (humain ou animal) : le passage d'un courant transitoire d'une certaine valeur efficace est suffisant pour entraîner des risques d'électrocution par une attaque cardiaque ou d'insuffisance respiratoire, avec le risque de brûlures.

La foudre provoque deux types d'effets :

- 1) *Les effets directs* : lorsque cette dernière frappe un bâtiment ou une zone spécifique. Cela peut causer des dommages considérables, généralement par l'incendie. La protection contre ce danger est fournie par les paratonnerres.
- 2) *Les effets indirects* : lorsque les coups de foudre ou une surtension frappe des câbles ou des liaisons de transmission électriques.

D'où la nécessité de protéger avec un parafoudre le matériel à risque contre la surtension et les courants indirects générés. En plus de ce qui est cité par avant, lorsqu'un coup de foudre nuage-sol ou nuage-tour aura lieu, le courant de son arc en retour génère un champ électromagnétique. Le couplage entre ce dernier champ avec les différents systèmes électriques, électroniques ou de télécommunication provoque des perturbations électromagnétiques qui se présentes sous la forme des courants ou des tensions induites qui superposent aux signaux utiles de ces systèmes, ce qui cause des dégâts intolérables soit au niveau des matérielles ou bien au niveau du bon fonctionnement. [23]

Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous somme intéresser à la présentation de quelques facettes liée à la physique du phénomène naturelle dit la foudre. Ainsi, on a présenté beaucoup plus les définitions des différents mécanismes de la décharges de la foudre, ces caractéristiques, et ces effets, puis nous avons donnés une brève présentation concernant les observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques associés.

Chapitre II :

La modélisation du courant et des rayonnements électromagnétiques de la foudre



II.1- Introduction

Dans les études de l'interaction des champs électromagnétiques générés par la foudre avec les différents systèmes électriques et/ou électroniques, la connaissance de la source des champs électromagnétiques est très importante. Les signaux perturbateurs sont générés par la propagation du courant de l'arc en retour le long du canal de foudre.

Dans ce chapitre, nous allons aborder, Premièrement, la modélisation mathématique du courant de foudre (arc en retour subséquent). Nous mettrons l'accent sur les modèles de représentation du courant de foudre dits les modèles d'ingénieur. Nous abordons ensuite la modélisation de ce courant à la base du canal de la foudre, ensuite la modélisation du ce courant en présence d'une tour élevée. Dans la deuxième partie du chapitre, on va présenter la modélisation des champs électromagnétiques de la foudre, passant par la méthode FDTD vu quelle sera la méthode utilisée pour la résolution des équations de Maxwell.

II.2- Courant d'arc en retour à la base du canal de foudre

Le courant associé à un coup de foudre est un courant de court-circuit entre le nuage et le sol. Les campagnes de mesures nous donnent les différentes caractéristiques de ce courant à la base du canal de foudre. Ces caractéristiques ont une très grande importance dans la détermination des formules des courants d'arcs en retour à la base du canal de coup de foudre, ainsi que pour la détermination de la distribution du courant de foudre le long du canal ou le long de la tour.

II.2.1- Formulations mathématiques du courant associé à un coup de foudre

II.2.1.1-La fonction d'Heidler

Les expressions analytiques habituellement adoptées pour représenter le courant de l'arc en retour à la base du canal $i_0(t)$, sont basées sur celle proposée par Heidler [24], et souvent désignée sous le nom de "la somme de deux fonction d'Heidler", définie par

$$i_0(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^2}{1+(t/\tau_{11})^2} e^{-\frac{t}{\tau_{21}}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{12})^2}{1+(t/\tau_{12})^2} e^{-\frac{t}{\tau_{22}}} \quad \text{II.1}$$

- I_{01}, I_{02} est l'amplitude du courant à la base du canal.
- τ_{11} est le temps de montée de l'impulsion du courant.
- τ_{12} est la durée de l'impulsion du courant.
- n est un exposant ayant des valeurs comprises entre 2 et 10.
- η_1, η_2 est le facteur de correction d'amplitude du courant, obtenu par :

$$\eta_1 = \exp \left[\left(-\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} \right) \left(n \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{1/n_1} \right] \quad \text{II.2}$$

$$\eta_2 = \exp \left[\left(-\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}} \right) \left(n \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}} \right)^{1/n_2} \right] \quad \text{II.3}$$

La fonction d'Heidler a été introduite parce qu'elle répond à de nombreuses contraintes :

- ❖ Elle présente une dérivée temporelle de second ordre égale à zéro à $t = 0$.
- ❖ Elle est cohérente avec les formes d'ondes de courant de retour mesurées.
- ❖ Elle permet aussi un réglage précis et facile de l'amplitude du courant, la dérivée du courant maximale et la quantité de charges électriques transférées de façon presque indépendante en faisant varier I_0 , τ_1 et τ_2 , respectivement [14].

Tableau II.1. Les paramètres des deux fonctions d'Heidler [25].

	$I_{01}(\text{KA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	n_1	$I_{02}(\text{KA})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	n_2
Premier arc	28	1.8	95	2	-	-	-	-
Arc subséquent	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

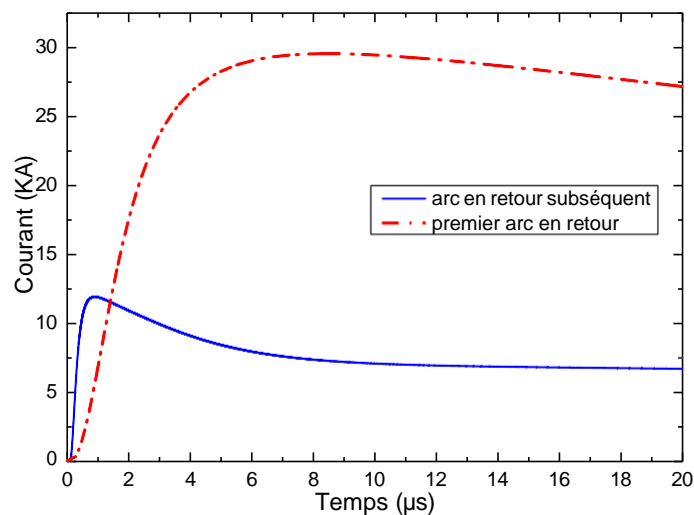


Figure. II.1. Premier arc et l'arc en retour subséquent à la base du canal.

II.2.2- Classification des Modèles du courant de l'arc en retour :

Depuis 1941, toute une série de modèles relatifs à la distribution spatio-temporelle du courant de foudre a été proposée par la communauté scientifique. Il s'agit des modèles macroscopiques qui ont été développés dans le but d'évaluer le rayonnement électromagnétique d'un canal de foudre [26, 27,28].

Les modèles de l'arc en retour proposés dans la littérature diffèrent l'un de l'autre. En général ils sont classés en quatre grandes classes [26, 28, 29,30]

- ✓ Les modèles « physiques »
- ✓ Les modèles « électromagnétiques »
- ✓ Modèles dit « modèles RLC »
- ✓ Modèles dit « d'ingénieurs »

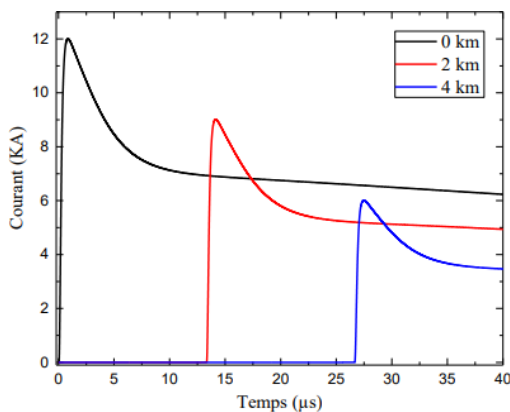
Dans la suite de ce chapitre, nous allons nous intéresser seulement aux modèles d'ingénieur pour les raisons suivantes :

- ✓ Le nombre restreint de paramètres ajustables.
- ✓ La relation simple qui existe entre le courant dans le canal de foudre et le courant à la base du canal de foudre (mesurable expérimentalement).

II.2.3- Les modèles d'ingénieur

Ces modèles ont connu beaucoup d'évolution au cours du temps depuis le modèle de Bruce et Gold de 1941, dans cette étude on s'intéresse seulement sur le Modèle de ligne de transmission modifiée (MTL) 1987-1990, [31] pour résoudre ces problèmes. Il est divisé en deux grandes familles comme suit :

- 1) **Modèle de la ligne de transmission modifié avec décroissance linéaire-MTLL.** 1988-1990[31.32], l'intensité du courant est supposée se désintégrer linéairement en se propageant dans le canal et elle est exprimée par :

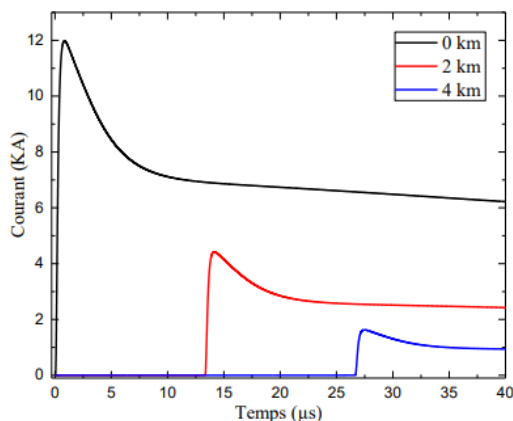


$$i(z, t) = i(0, t - z/v) * (1 - z/H) \quad t \geq T \quad \text{II.4}$$

$$i(z, t) = 0 \quad t < T \quad \text{II.5}$$

Figure II.2. La distribution temporelle du courant de l'arc en retour subséquent pour le modèle MTLL [33].

- 2) **Modèle de la ligne de transmission modifié avec décroissance exponentiellement-MTLE.** Proposée par Nucci et al. en 1988 [34] (voir aussi Rachidi et Nucci [35]), le courant de l'arc en retour est censé se décroître exponentiellement en se propageant dans le canal et il est exprimé par :



$$i(z, t) = i(0, t - z/v) * e^{-z/\lambda t} \quad t \geq T \quad \text{II.6}$$

$$i(z, t) = 0 \quad t < T \quad \text{II.7}$$

Figure II.3- La distribution temporelle du courant de l'arc en retour subséquent pour le modèle MTLE [33].

II.4- Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé :

II.4.1- Géométrie du problème :

Pour le calcul du courant associé à un coup de foudre nuage-sol, le canal de foudre est considéré comme une antenne verticale unidimensionnelle de hauteur H, placée au-dessus d'un plan caractérisé par sa conductivité électrique et sa permittivité diélectrique, est supposé plat et homogène comme l'indique la figure.II.4.

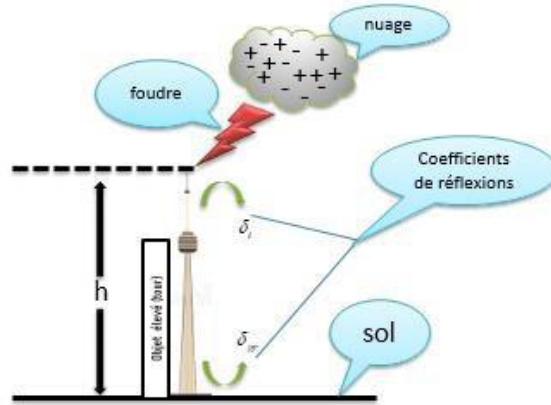


Figure II.4- Géométrie du problème adoptée pour coup de foudre tombant sur une tour.

II.4.2- Modèle de Rachidi et al :

Les modèles d'ingénieur initialement proposés dans le cas d'un arc en retour initié du sol [36] ont été modifiés en 2002 par Rachidi et al [37]. Les formules de la distribution spatio-temporelle du courant de foudre pour ce modèle [37] sont données par les expressions suivantes :

➤ Pour : $0 \leq z' \leq h$

$$I(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{m=0}^{\infty} \left[\begin{aligned} &\rho_g^n \rho_t^n I_0 \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \\ &+ \rho_g^n \rho_t^{n+1} I_0 \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{aligned} \right] \quad \mathbf{11.8}$$

• Pour : $h \leq z' \leq H$

$$I(z', t) = \left[\begin{aligned} &p(z' - h) I_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{v^*} \right) - \rho_t I_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{c} \right) \\ &+ (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n I_0 \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{aligned} \right] u \left(t - \frac{z' - h}{v} \right) \quad \mathbf{11.9}$$

Avec :

$$\rho_{top} = \frac{z_{tour} - z_{canal}}{z_{tour} + z_{canal}} \quad \mathbf{11.10}$$

$$\rho_{bot} = \frac{z_{tour} - z_{gr}}{z_{tour} + z_{gr}} \quad \mathbf{11.11}$$

Les équations (II.8) et (II.9) sont basées sur le concept du courant 'non contaminé' $I_0(t)$, qui représente le courant idéal qui serait mesuré au sommet de la tour si les coefficients de réflexion à ses deux extrémités sont nuls.

II.4.3 - Modèle de Baba et Rakov :

En 2005, Baba et Rakov [38] ont proposé une autre approche basée sur l'utilisation d'une série de sources de tension dans la jonction tour-canal. Ils ont montré qu'une telle représentation est équivalente à celle de Rachidi et al. Dans leur représentation, Baba et Rakov ont exprimé la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre en terme du courant de court-circuit $I_{sc}(t)$, qui est relié au courant « non contaminé » par :

$$I_{sc}(t) = 2I_0(t) \tag{II.12}$$

La distribution spatio-temporelle du courant de foudre, selon le modèle de Baba et Rakov [38], est donnée par les expressions suivantes :

➤ Pour : $0 \leq z' \leq h$

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{top}}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{aligned} &\rho_{bot}^n \rho_{top}^n I_{sc} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \\ &+ \rho_{bot}^{n+1} \rho_{top}^n I_{sc} \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{aligned} \right] \tag{II.13}$$

Pour : $h \leq z' \leq H$

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{top}}{2} \left[I_{sc} \left(h, t - \frac{z - h'}{v} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_{bot}^n \rho_{top}^{n-1} (1 + \rho_{top}) I_{sc} \left(h, t - \frac{z - h'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \tag{II.14}$$

II.4.4 – Circuit équivalent représentant un coup de foudre frappant une tour élevée :

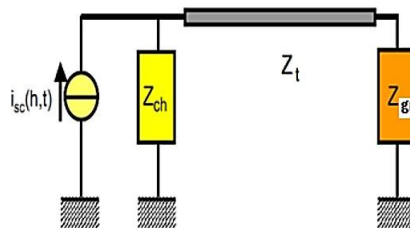


Figure II.5- Schéma électrique équivalent au modèle de Baba et Rakov [38].

Avec :

z_{ch} : Impédance du canal de coup de foudre ;

z_t : Impédance de la tour,

z_{gr} : Impédance du sol

Considérons deux modèles simplifiés ; de la tour de Peissenberg et de la tour CN en Canada, avec les paramètres comme indique le tableau (**Tableau II.2**) suivants :

Tableau II.2. Les paramètres des deux tours.[32]

La tour		Peissenberg (Allemagne)	CN (canada)
La hauteur		168 m	533 m
Coefficient de réflexion	Sommet	-0.53	-0.366
	La base	0.7	0.8

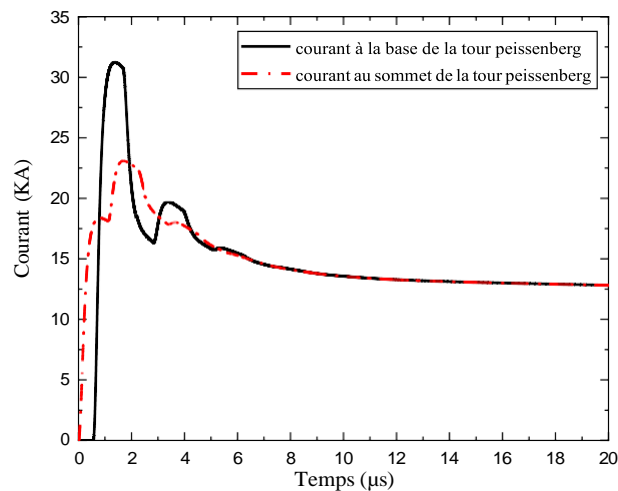


Fig. 1. **Figure II.6-** Courant à la base et au sommet de la tour Peissenberg.

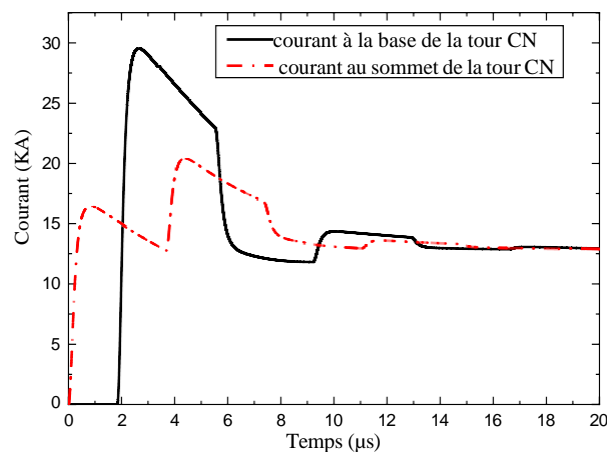


Fig. 2.

Fig. 3. **Figure II.7-** Courant à la base et au sommet de la tour CN.

Les figures II.6- II.7, montrent la distribution temporelle du courant au sommet et à la base de la tour Peissenberg et la tour CN, respectivement. Cette distribution est, significativement, influencée par les réflexions multiples de l'onde de courant provenant des extrémités de la tour. On peut également voir que le courant à la base de la tour a une valeur

de pic plus élevée que celui au sommet en raison de la contribution de l'onde réfléchie au niveau du sol.

II.5- Calcul de champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour :

L'extension des modèles d'ingénieur adoptés pour la détermination du courant de l'arc en retour le long de la tour et le long du canal de foudre, pour un coup de foudre initié d'un objet élevé (tour), laisse la géométrie inchangée en ce qui concerne le calcul du champ électromagnétique. Comme il est illustré sur la Figure.[32]

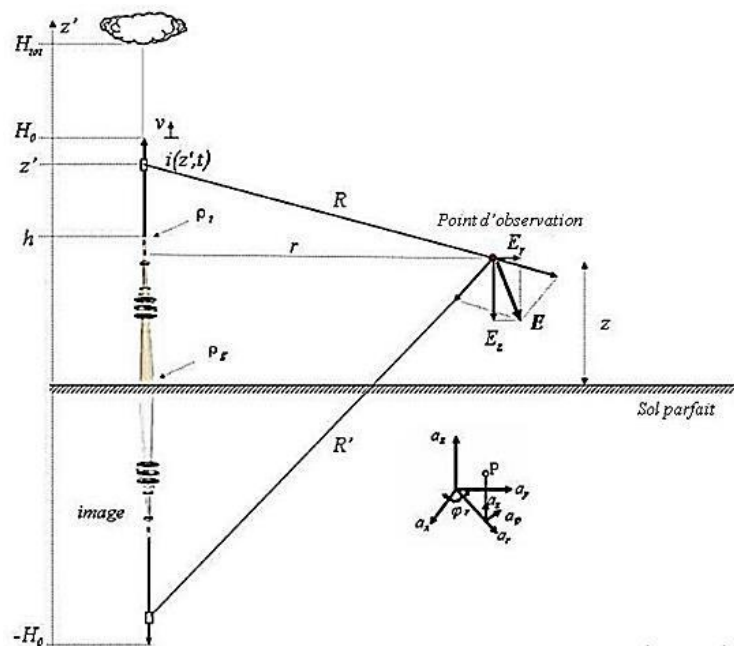


Figure II.8- Géométrie du problème pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par la foudre en présence d'une tour (cas d'un sol parfait) [39].

II.5.1- Les méthodes numériques en électromagnétisme :

Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des équations aux dérivées partielles. En général, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes numériques. Pour des géométries plus complexes, on a recourt à des méthodes numériques qui font appel à des techniques de discrétisation. En effet, elles transforment les équations aux dérivées partielles du champ en un système d'équations algébriques compte tenu des conditions aux limites. Parmi les méthodes numériques qu'il existe en électromagnétiques :

- ✓ La méthode des volumes finies (FVM)
- ✓ La méthode des différences finies (FDM),
- ✓ La méthode des éléments finis (FEM).
- ✓ La méthode des Différences Finies en Domaine Temporel (FDTD).

1) **Méthode des volumes finis** : Les méthodes de volumes finis sont en quelque sorte complémentaire des méthodes de différences finies et des méthodes d'éléments finis, La structure de données est en effet très proche de celle des différences finies lorsque ces méthodes sont utilisées sur un maillage cartésien, tout en autorisant une plus grande souplesse géométrique sur les maillages non cartésiens comme cela est le cas pour les méthodes d'éléments finis. Les méthodes de volumes finis sont aussi très utilisées pour la discrétisation numérique des équations aux dérivées partielles non linéaires, telles que les équations de la dynamique des gaz compressibles. Ce sont aussi des méthodes très robustes. Ces propriétés expliquent leur intérêt. Cependant le principe de construction qui s'appuie sur des formules intégrales plutôt que différentielles est différent des méthodes de différences finies ou d'éléments finis [40-41].

2) **Méthode des éléments finis** : Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important [42,43].

3) **Méthode des différences finies** : La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir l'incapacité de Modéliser des géométries de forme complexe. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrit pour chaque nœud du maillage. La méthode est difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles [42, 43].

La méthode des différences finies dans le domaine temporel « FDTD », plus simple conceptuellement et la plus aisée à mettre en œuvre est l'une des méthodes les plus utilisées en modélisation électromagnétique. Elle permet de modéliser la structure à étudier d'une manière très proche de la réalité. Il faut noter que la FDTD est une méthode qui fait partie de la famille des méthodes volumiques, elle exige un temps de calcul un peu long dépendant de la taille du domaine simulé. Comparée aux méthodes : FVM, FEM et FDFD, la FDTD est considérée comme un bon choix pour notre travail, pour les raisons suivantes :

- ✓ Traitement et résolution des équations de Maxwell dans le domaine temporel,
- ✓ Simplicité de ses formules et de son algorithme,
- ✓ Sa robustesse et sa flexibilité.

II.5.2- La méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD) :

II.5.2.1- Présentation de la méthode FDTD

Nous présentons ici le fondement de la méthode des différences finies, ou Différences Finies en Domaine Temporel (FDTD), appliquée à la résolution d'un problème électromagnétique dans le domaine temporel. La propagation d'ondes électromagnétiques dans l'espace est un problème bien connu, parfaitement modélisé par les équations de Maxwell. En 1966, K. Yee a proposé une technique de résolution numérique de ces équations. Le schéma numérique utilisé, désormais appelé schéma de Yee, fondé sur la discrétisation en temps et en espace des équations de Maxwell par des différences finies centrées, permet de calculer à chaque instant discret du temps la solution du problème électromagnétique en chaque point d'un espace discret. Cette technique est aujourd'hui très largement utilisée dans tous les domaines d'application de l'électromagnétisme. [44]

II.5.2.2- Principe de base de la méthode FDTD

Les équations de Maxwell décrivent la propagation d'ondes électromagnétiques dans tout type de milieu. On considère par la suite un milieu homogène, anisotrope, dépourvu de sources, non dispersif et pouvant présenter des pertes électriques et magnétiques. Ainsi, dans un tel milieu les équations de Maxwell sous forme différentielle s'écrivent de la manière suivante : [45]

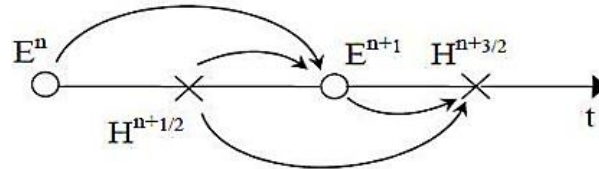


Figure II.9- Principe de la discrétisation temporelle. [46]

La première équation donne la dérivée temporelle du champ magnétique en fonction de la dérivée spatiale du champ électrique. Inversement, la seconde équation donne la dérivée temporelle du champ électrique en fonction de la dérivée spatiale du champ magnétique. Comme on le verra, la première équation sera utilisée pour faire avancer le champ magnétique dans le temps tandis que la seconde sera utilisée pour faire avancer le champ électrique. La méthode dans laquelle un champ est avancé, puis l'autre, puis le processus est répété, est connue sous le nom de «Leap Frog».

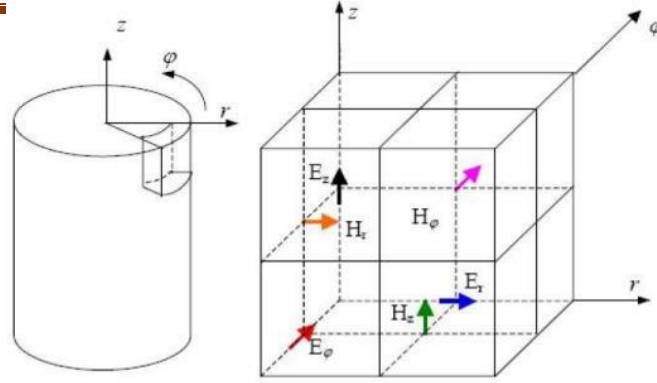


Figure II.10- Maillage spatial en coordonnées cylindriques. [46]

On remarque dans les figures II.9 le décalage d'un demi-pas spatial et temporel, entre les composantes du champ électrique E et celles du champ magnétique H . inhérent à l'approximation des opérateurs de dérivation par le schéma centré des différences finies.

Le champ électrique à l'instant « $n+1$ » est calculé en fonction du champ électrique à l'instant « n », c'est-à-dire, la valeur obtenue dans le pas temporel précédent, et la valeur du champ magnétique à l'instant « $n+1/2$ » (voir la figure.II.9) [46]. Pour l'analyse du champ électromagnétique rayonné par la foudre, on peut adopter un domaine de calcul à deux dimensions (2D) avec un système à coordonnées cylindriques (voir Figure. II.9-II.11).

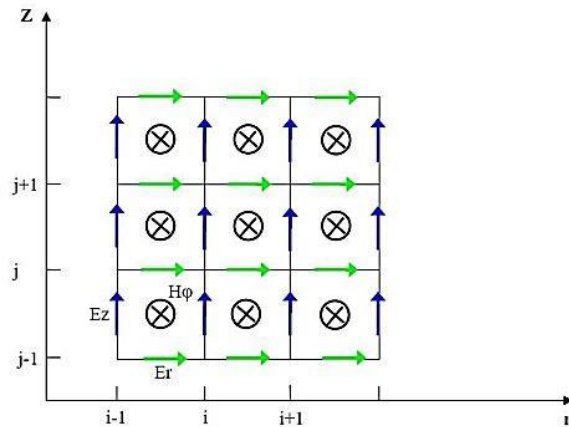


Figure II.11- Domaine de calcul en (2D) avec un système à coordonnées cylindriques. [46]

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right] \quad (\text{II.15})$$

$$\sigma E_r + \varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} = -\frac{\partial H_\phi}{\partial z} \quad (\text{II.16})$$

$$\sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) \quad (\text{II.17})$$

La résolution de ce système d'équation est obtenue en mettant en œuvre l'approche FDTD. Tout d'abord, on définit chaque fonction spatio-temporelle f évaluée en chaque point de l'espace et à chaque instant comme : $f(i\Delta_r, j\Delta_z, n\Delta t) = f^n(i, j)$ Ou Δr et Δz représentent les pas spatiaux, respectivement dans les deux directions, radial et verticale, Δt est le pas temporel de propagation, i, j et n sont les incréments dans l'espace et dans le temps.

Les approximations du premier ordre des équations aux dérivées partielles s'écrivent comme suit :

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial r} \right| = \frac{f^n(i + \frac{1}{2}, j) - f^n(i - \frac{1}{2}, j)}{\Delta r} \quad (\text{II.18})$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial z} \right| = \frac{f^n(i, j + \frac{1}{2}) - f^n(i, j - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (\text{II.19})$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial t} \right| = \frac{f^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - f^{n-\frac{1}{2}}(i, j)}{\Delta t} \quad (\text{II.20})$$

A partir des équations aux dérivées partielles (II.29)-(II.31) et en utilisant les équations (II.32)-(II.34) on obtient les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre qui s'écrivent :

$$E_z^{n+1}(i, j+1) = \frac{2\varepsilon\sigma\Delta_t}{2\varepsilon + \Delta_t} E_z(i, j+1/2) + \frac{2\Delta_t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta_t)r\Delta_r} \begin{bmatrix} r_{i+1/2} H_\phi^{n+1/2}(i+1-2, j+1/2) \\ -r_{i+1/2} H_\phi^{n+1/2}(i+1/2, +1/2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$E_r^{n+1}(i, j+1) = \frac{2\varepsilon\sigma\Delta_t}{2\varepsilon + \Delta_t} E_z(i, j+1/2) + \frac{2\Delta_t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta_t)\Delta_r} \begin{bmatrix} H_\phi^{n+1/2}(i+1-2, j+1/2) \\ H_\phi^{n+1/2}(i+1/2, +1/2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$H_\phi^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) = H_\phi^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2) + \frac{\Delta_t}{\mu\Delta_r} \left[E_z^n(i, 1, j+1/2) - E_z^n(i, j+1/2) \right] - \frac{\Delta_t}{\mu\Delta_r} \left[E_r^n(i+1, j+1/2) + E_r^n(i, j+1/2) \right] \quad (\text{II.23})$$

II. 6- Conditions aux limites absorbantes (absorbing boundary condition)

Pour simuler la propagation d'ondes électromagnétiques dans un milieu non borné (structure ouverte), il faut ramener les calculs effectifs à un domaine borné à l'aide de conditions aux limites artificielles choisies de façon ce que la solution obtenue soit la plus proche possible de la restriction de la solution exacte. La difficulté consiste à conserver un problème aux limites bien posé tout en cherchant à minimiser les réflexions parasites sur

frontière artificielle (figure III.1). Le développement des conditions aux limites absorbantes a été l'un des secteurs les plus actifs dans la recherche des méthodes aux différences finies (FDTD) au cours des dernières années. Pour cela, il existe de nombreuses méthodes permettant de simuler l'espace infini. [43 44]

Dans ce travail, on a utilisé les conditions aux limites absorbantes au premier ordre développées par Mur [168]. Leurs approximations aux différences finies sont comme suit :

1. Dans la direction r :

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i_{max} + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{2N-1v\Delta t-\Delta r}{2N+1v\Delta t+\Delta r} H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i_{max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{v\Delta t-\Delta r}{v\Delta t+\Delta r} H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i_{max} + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{2N-1}{2N+1} H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i_{max} - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) \quad (\text{II.24})$$

Où : $i_{max} = N$

2. Dans la direction Z :

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} + \frac{1}{2}\right) = H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} - \frac{1}{2}\right) + \frac{v\Delta t-\Delta z}{v\Delta t+\Delta z} \left[H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} - \frac{1}{2}\right) - H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{max} + \frac{1}{2}\right) \right] \quad (\text{II.25})$$

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} - \frac{1}{2}\right) = H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} + \frac{1}{2}\right) + \frac{v\Delta t-\Delta z}{v\Delta t+\Delta z} \left[H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} + \frac{1}{2}\right) - H_{\varphi}^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j_{min} - \frac{1}{2}\right) \right] \quad (\text{II.26})$$

Où : $j_{min} = 0, j_{max} = M$

3. Dans la région « source », selon la loi d'Ampère, l'équation de peut s'écrire :

$$E_z^{n+1}\left(0, j + \frac{1}{2}\right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta_t}{2\varepsilon + \sigma\Delta_t} E_z^n\left(0, j + \frac{1}{2}\right) + \frac{8\Delta_r}{(2\varepsilon + \sigma\Delta_t)\Delta_r} H_{\varphi}^{n+1/2}\left(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{4\Delta_t}{\pi\varepsilon_0\Delta_r^2} i^{n+1/2}\left(0, j + \frac{1}{2}\right) \quad (\text{II.27})$$

Où : $i^{n+1/2}\left(0, j + \frac{1}{2}\right)$ est l'élément du courant de l'arc en retour à la hauteur Δ_z et à l'instant $\Delta_z.(j + \frac{1}{2})$ et l'instant $\Delta_r(n + \frac{1}{2})$

Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la modélisation du courant de foudre, pour les deux cas, un coup qui tombe sur le sol, ou on a utilisé les deux équations d'Heidler pour représenter le courant à la base du canal. Ensuite, nous avons présenté l'extension des modèles d'ingénieur pour prendre en compte la présence d'un objet élevé. L'interaction de la foudre avec les objets élevés (tours), attire, jusqu'à aujourd'hui, l'attention de beaucoup de chercheurs à travers le monde. On a présenté les deux modèles utilisés dans la littérature (modèle de Rachidi, et modèle de Baba et Rakov) pour la représentation du courant le long de canal de la foudre et le long de la tour. Après on a passé à la modélisation des rayonnements électromagnétiques générés par l'interaction d'un coup de foudre avec une tour. Dans cette étude nous avons présenté une brève description de la méthode FDTD, vu quelle est la méthode utilisée pour la résolution des équations de Maxwell dans notre travail. La FDTD est la méthode la plus adaptée pour l'étude du rayonnement électromagnétique de la foudre.

La plupart des modèles considérés sont adéquats dans les calculs, où ils reproduisent les composantes du champ électromagnétique avec une précision raisonnable par rapport aux données expérimentales disponibles. Les versions modifiées du modèle TL (MTLE et MTLL) sont probablement les modèles les plus raisonnables entre la simplicité mathématique et la précision.

Chapitre III :

Résultats et analyses

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons une analyse du comportement du champ électromagnétique à proximité de la tour Peissenberg de hauteur 168 m située en Allemagne, et la tour CN de hauteur 553m au Canada. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des différentes distances de deux tours. Pour la tour Peissenberg les composantes du champ électromagnétique sont calculées au-dessus du sol avec $h = 10\text{m}$, et en-dessous du sol avec un profondeur $p = 1\text{m}$ pour trois distances horizontales à savoir $r_1 = 150\text{m}$, $r_2 = 198\text{m}$ et $r_3 = 250\text{m}$. Pour la tour CN, les composantes du champ électromagnétique sont calculées au-dessus du sol avec $h = 10\text{m}$, et en-dessous du sol avec un profondeur $p = 1\text{m}$ aussi ; mais pour une seule distance horizontale $r = 198\text{m}$. En adoptant le modèle de Baba et Rakov. En adoptant la méthode FDTD dans un système de coordonnées 2D cylindriques.

III.2. Application de la méthode FDTD pour le calcul de champ électromagnétique de la foudre

III 2.1. Coup de foudre tombant sur la tour Peissenberg (168m) :

Pour l'analyse de l'environnement électromagnétique de l'arc en retour initié à la tour Peissenberg, et en présence d'un sol stratifié verticalement, on a adopté la géométrie représentée sur la figure III.1. Le champ électromagnétique est calculé au-dessus du sol avec $h = 10\text{m}$, et en-dessous du sol avec une profondeur $p = 1\text{m}$ pour trois distances horizontales à savoir $r_1 = 150\text{m}$, $r_2 = 198\text{m}$ et $r_3 = 250\text{m}$.

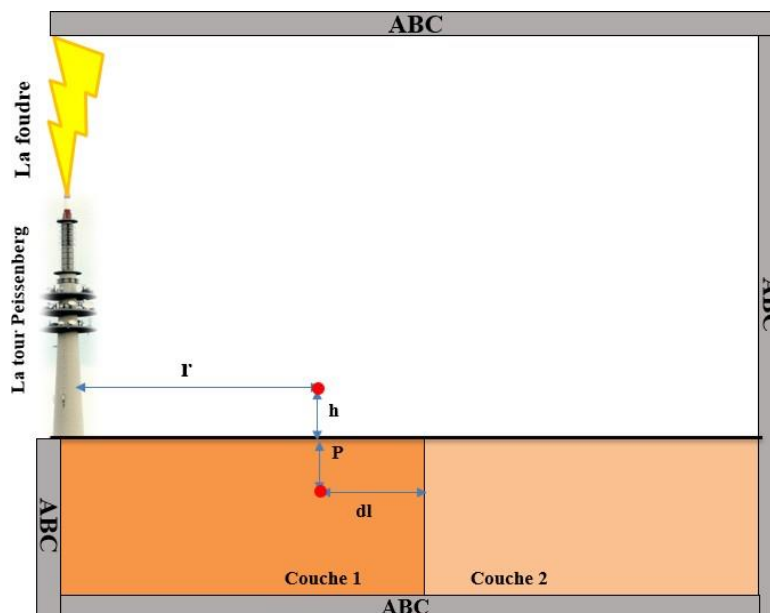


Figure III. 1 : Géométrie du problème. (La tour peissenberg).

Les valeurs adoptées des paramètres électriques des couches du sol sont données dans le tableau.III.1. Les épaisseurs des deux couches ont été fixées à 200m et 1800m, respectivement (voir Figure. III.1). Quatre cas ont été considérés dans la simulation : les cas 2

et 4 sont des cas de base correspondant à un sol homogène, alors que les cas 1 et 3 représentent deux configurations de sol à deux couches. La stratification verticale du sol a été prise en compte simplement en considérant différentes valeurs pour les paramètres électriques du sol lors du passage d'un point de la grille à un autre appartenant à une couche différente.

Tableau III.1 les paramètres électriques pour les 02 couches. [47]

	$\sigma_1(\text{s/m})$	ϵ_{r1}	$\sigma_2(\text{s/m})$	ϵ_{r2}
Cas 01 : sol stratifié ($(\sigma_1 < \sigma_2)$)	0.1	80	0.002	5
Cas 02 : sol homogène (conductivité élevée)	0.1	80	0.1	80
Cas 03 : sol stratifié ($(\sigma_1 > \sigma_2)$)	0.002	5	0.1	80
Cas 04 : sol homogène (conductivité faible)	0.002	5	0.002	5

1) Champs électromagnétiques au-dessus du sol

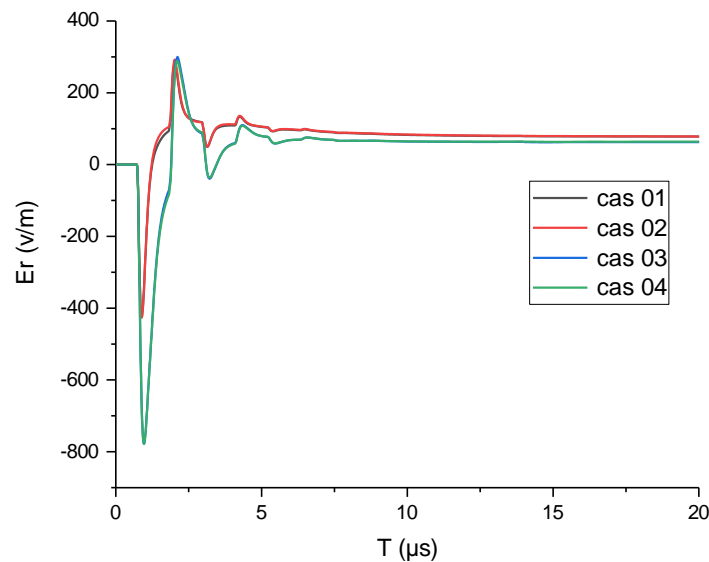


Figure III.2. Le champ électrique horizontal à $r=150\text{m}$ et $h=10\text{m}$;

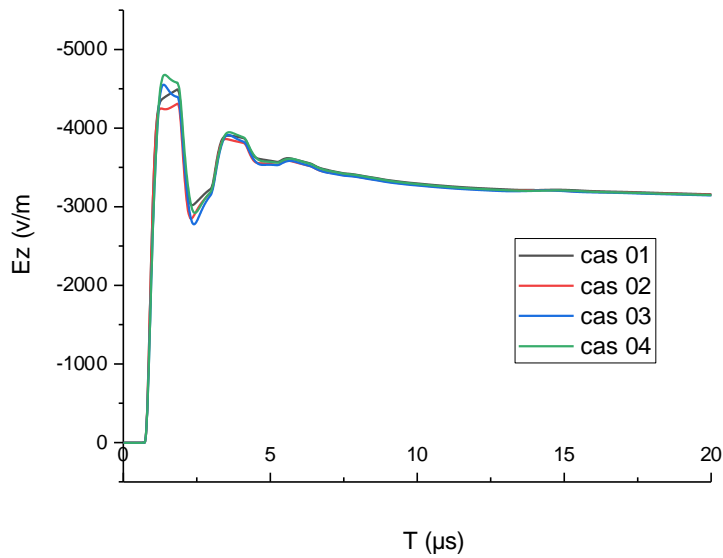


Figure III. 3. Le champ électrique vertical à $r = 150\text{m}$ et $h = 10\text{m}$.

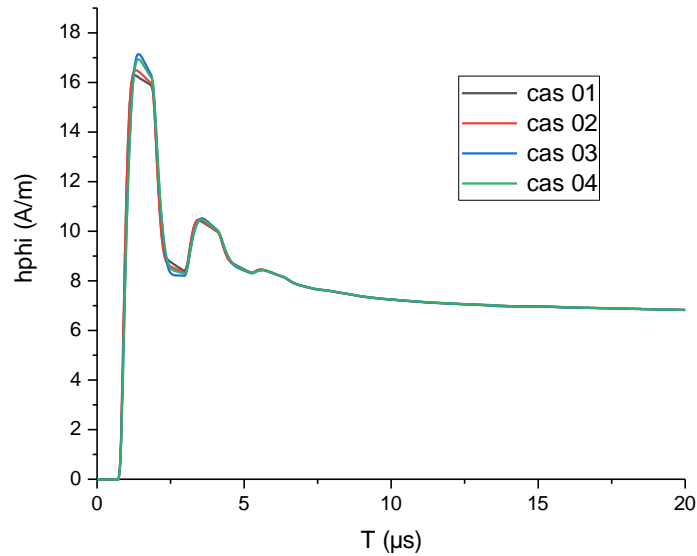


Figure III. 4. Le champ magnétique azimuthal à $r = 150\text{m}$ et $h = 10\text{m}$.

Les figures III. 2 -III. 4, représentent les composantes du champ électromagnétique à $r = 150\text{m}$ et $h = 10\text{m}$ au-dessus d'un sol stratifié verticalement. De ces figures, on peut dire que la stratification verticale n'a pas d'effet sur le champ électromagnétique au-dessus du sol pour une distance une distance de $r = 150\text{m}$ ($dl = 50\text{m}$), sauf le champ électrique horizontal (fig.III.2) ou on peut voir que la présence d'une deuxième couche moins conductrice (cas 04) engendre une légère augmentation dans l'amplitude.

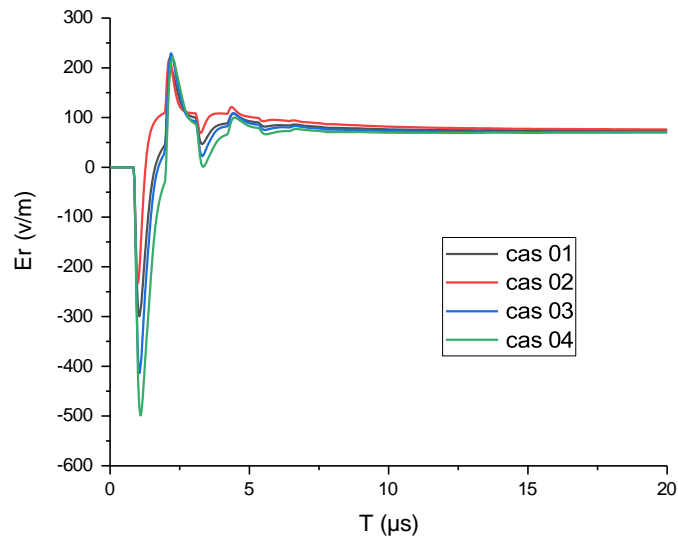


Figure III. 5. Le champ électrique horizontal à $r = 198m$ et $h = 10m$.

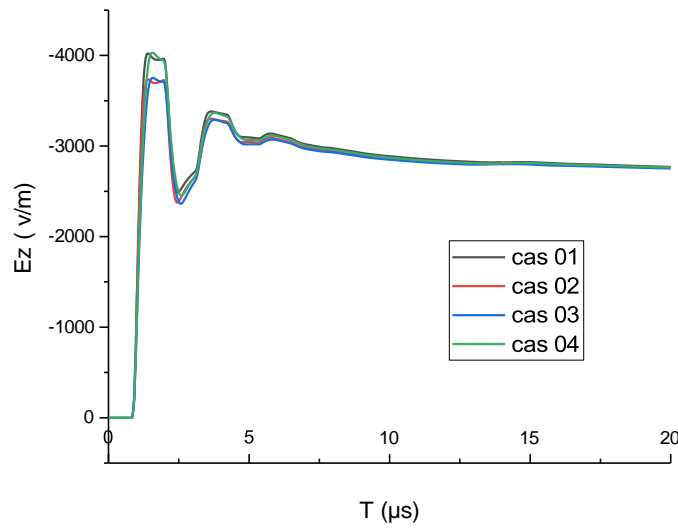


Figure III. 6. Le champ électrique vertical à $r = 198m$ et $h = 10m$.

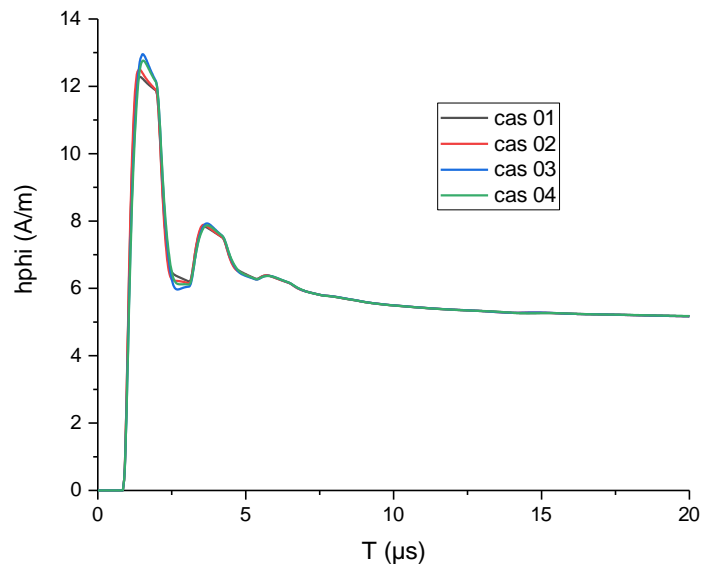


Figure III. 7. Le champ magnétique azimutal à $r = 198m$ et $h = 10m$.

Les figures III. 5-III. 7. représentent les composantes du champ électromagnétique à $r=198\text{m}$ ($dl = 2\text{m}$), et $h = 10\text{m}$ au-dessus du sol. On peut voir que les paramètres électriques du sol affectent le champ électrique horizontal (fig.III.5) et légèrement le champ électrique vertical (fig.III.6). Pour le champ horizontal la valeur crête de ce champ est inversement proportionnelle aux paramètres électrique du sol, et concernant le champ électrique vertical on constate que la présence d'une deuxième couche à faibles paramètres (cas 01) provoque une augmentation de l'amplitude du champ par rapport au cas d'un sol homogène avec des paramètres élevées (cas 02), et lorsqu'on ajoute une deuxième couche avec des paramètres élevés (cas 03) on remarque une diminution dans l'amplitude du champ électrique. Le champ magnétique azimuthal il n'est pas affecté par les paramètres électriques du sol et par la stratification verticale au-dessus du sol. Et donc on peut conclure qu'on peut déterminée ce dernier en considérant le domaine caractérisé uniquement par un sol homogène.

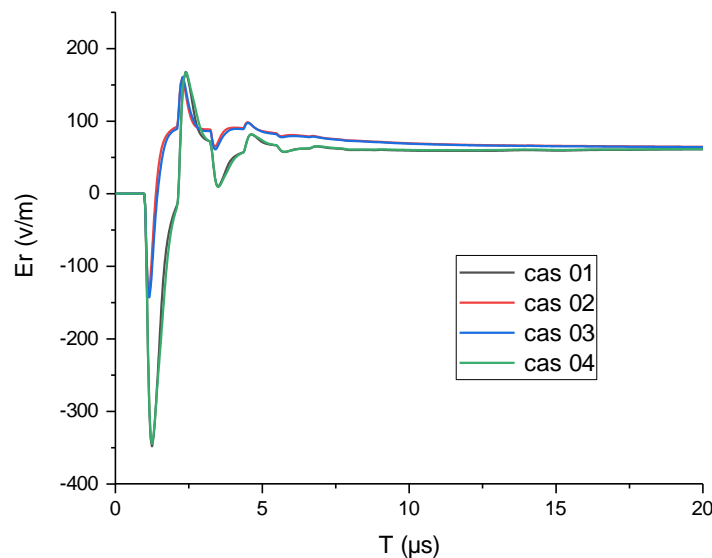


Figure III. 8. Le champ électrique horizontal à $r=250$ et $h=10$;

La figure III.8 représente la variation du champ électrique horizontal à $r = 250\text{m}$ et $h=10\text{m}$ au-dessus d'un sol. La première remarque est que ce champ est caractérisé par une polarité bipolaire, et que cette composante est affectée par la variation des paramètres électrique du sol, elle est inversement proportionnelle aux paramètres électriques du sol.

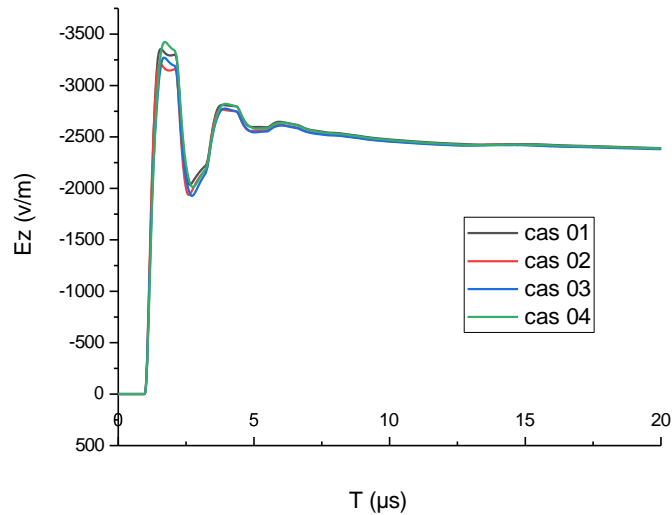


Figure III. 9. Le champ électrique vertical à $r = 250m$ et $h = 10m$.

D'après la figure III. 9, présente le champ électrique vertical à 250m de la tour ($dl = 50m$) au-dessus du sol. On constate que ce champ a une polarité positive et qu'il n'est pas influencé par la variation des paramètres électrique du sol.

D'après la figure III. 10, on peut confirmer que le champ magnétique azimuthal au-dessus du sol est presque insensible à la variation de la valeur de la conductivité du sol.

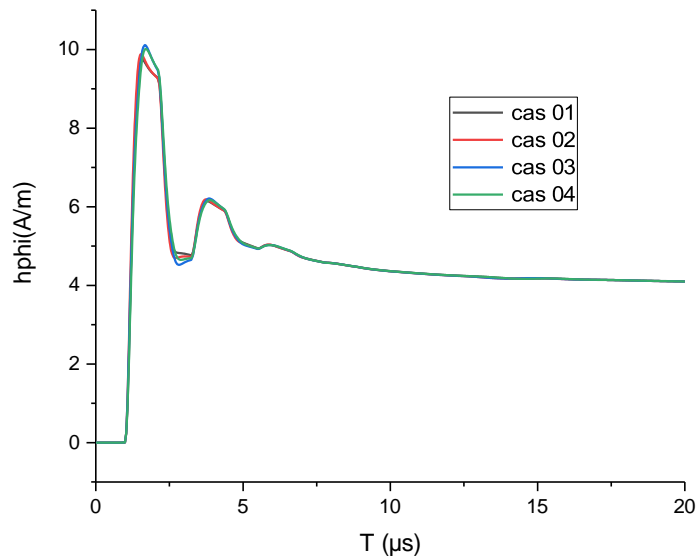


Figure III. 10. Le champ magnétique azimuthal à $r = 250m$ et $h = 10m$.

2) Champs électromagnétiques souterrains :

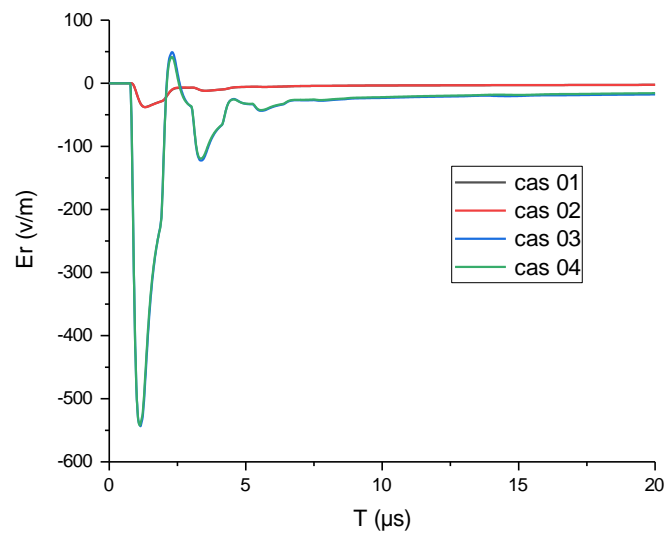


Figure III.11. Le champ électrique horizontal à $r = 150m$ et $p=1m$.

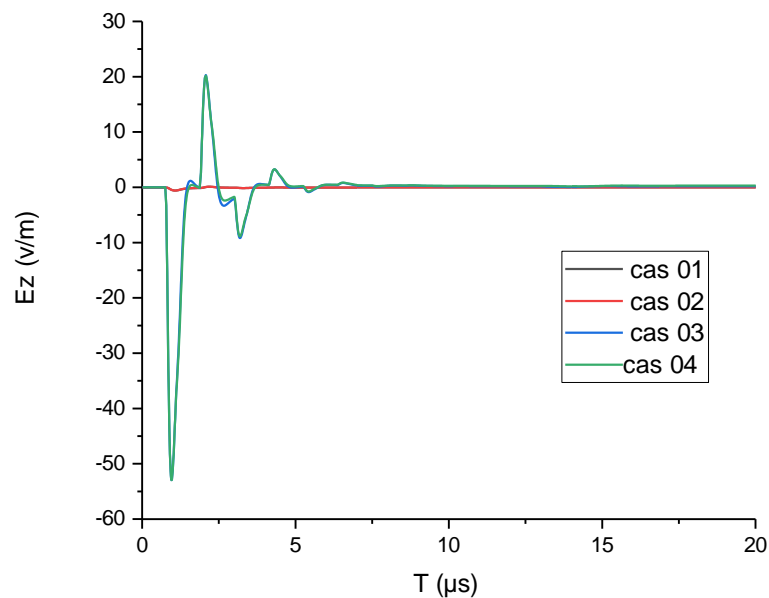


Figure III.12. Le champ électrique vertical à $r = 150m$ et $p = 1m$.

Les figures III.11-III.13 présentent les allures des composantes du champ électromagnétique mesurées à $r = 150m$ et $p = 1m$, on constate que la composante horizontale du champ électrique au-dessus ou en dessous du sol est toujours caractérisée par une polarité bipolaire, le champ électrique verticale (fig.III.12) est bipolaire aussi. Les trois composantes affectées par la variation des paramètres électrique (cas 01 avec cas 03) et (cas 02 avec 04), et pas affecté par la stratification parce que le point d'observation est loin de la deuxième couche ($d_1 = 50m$).

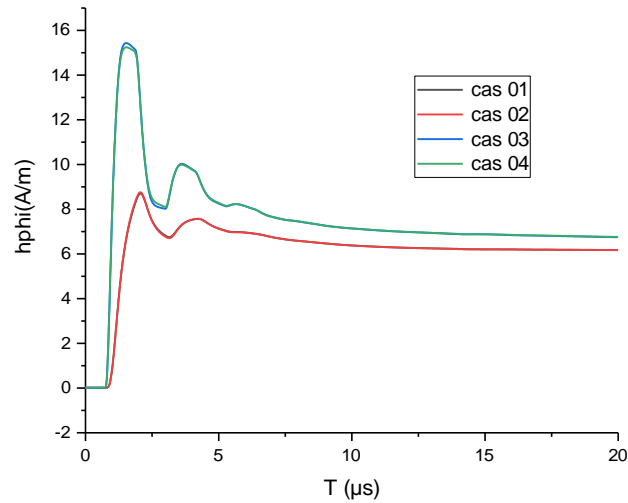


Figure. III.13. Le champ magnétique azimuthal à $r=150m$ et $p=1m$

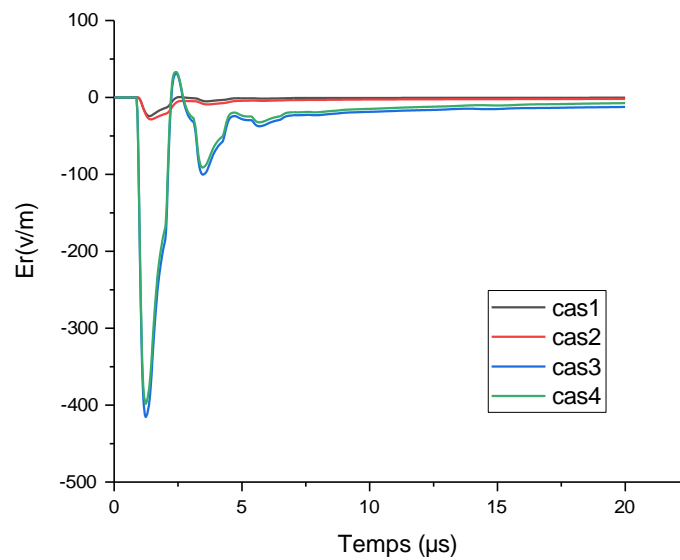


Figure. III.15. Le champ électrique horizontal à $r = 198 m$ et $p = 1m$.

Les fig.III.15-III.16 présentent le champ électrique horizontal à $r=198m$, $r = 250$ et $p = 1m$, on voit les mêmes remarques avec la distance $r = 150m$, il y a juste une différence dans l'amplitude. La présence d'une couche moins conductrice (cas 03 et 04) engendre une augmentation dans l'amplitude de cette composante.

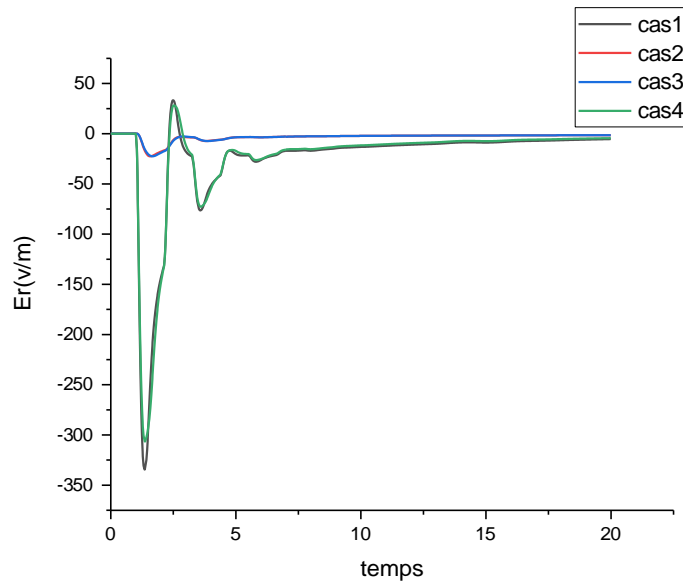


Figure. III.16. Le Champ électrique horizontal à $r = 250\text{m}$ et $p = 1\text{m}$.

La stratification verticale, souterraine, n'affecte pas le champ électrique horizontal (voir cas 1 avec 2, et cas 3 avec 4). Cette composante sous le sol peut être déterminée en considérant le sol homogène avec les paramètres électriques de la couche où se situe le point d'observation.

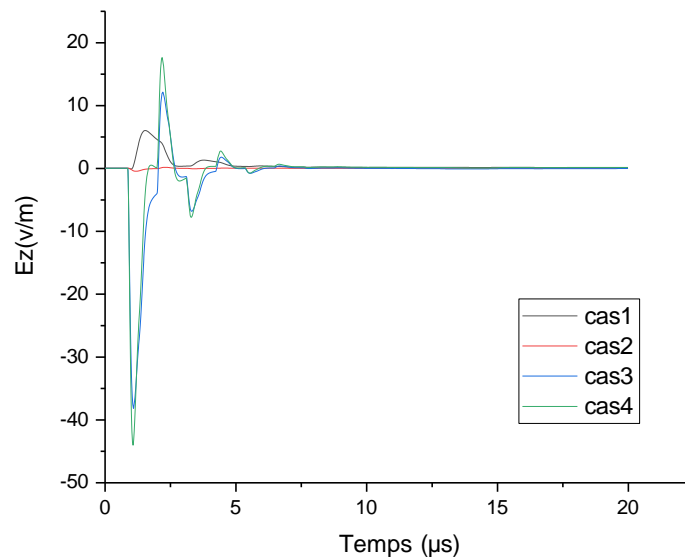


Figure. III.17. Le champ électrique vertical à $r = 198\text{m}$ et $p = 1\text{m}$

Les fig.III.17-III.18, présentent le champ électrique vertical souterrain pour $r = 198\text{m}$ et $r = 250\text{m}$, respectivement. On voit que les paramètres électriques du sol (cas 2 à 4) et la stratification verticale (cas 1 à 3) ont un effet La forme d'onde du champ électrique vertical. Cette composante est aussi inversement proportionnelle avec la conductivité (cas 02 et 04 par exemple).

Pour $r = 198\text{m}$ ($dl=1\text{m}$). On voit que les paramètres électriques du sol (cas 2 à 4) et la stratification verticale (cas 1 à 3) ont un effet important sur le champ électrique vertical.

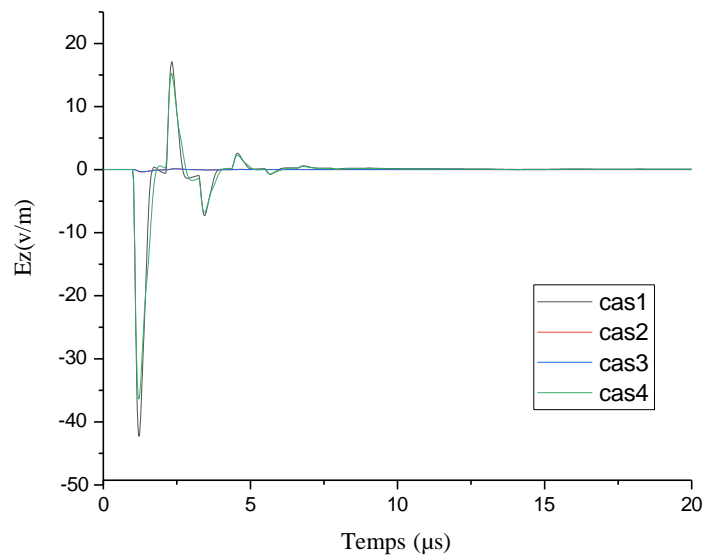


Figure. III.18. Le champ électrique vertical à $r = 250\text{ m}$ et $p = 1\text{ m}$.

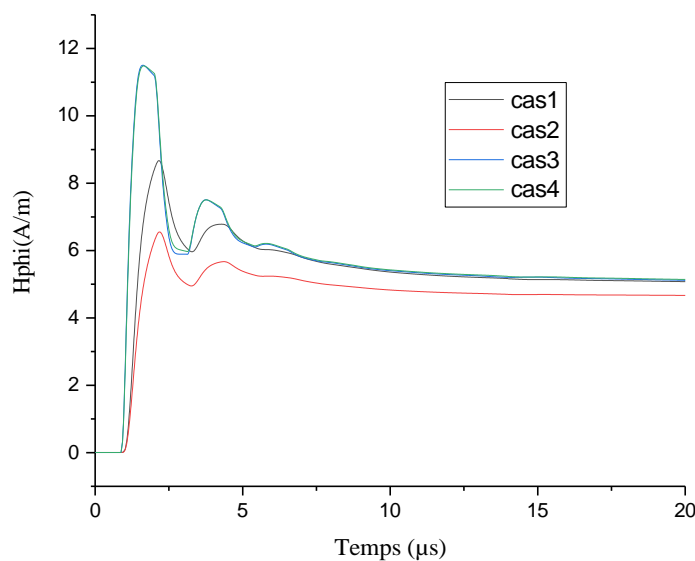


Figure. III.19. Le champ magnétique azimuthal à $r = 198\text{ m}$ et $p = 1\text{ m}$.

Les fig.III.19-III.20, présentent le champ magnétique azimuthal en dessous du sol pour $r = 198\text{m}$ et $r = 250\text{m}$. Oscillatoire amortie. On peut voir que la variation des paramètres électrique du sol affecte le champ magnétique (cas 02 et cas 04). La stratification verticale affecte la composante azimuthale uniquement pour $r = 198\text{m}$, cela justifie par la proximité de point d'observation de la deuxième couche ($d_1=2\text{m}$).

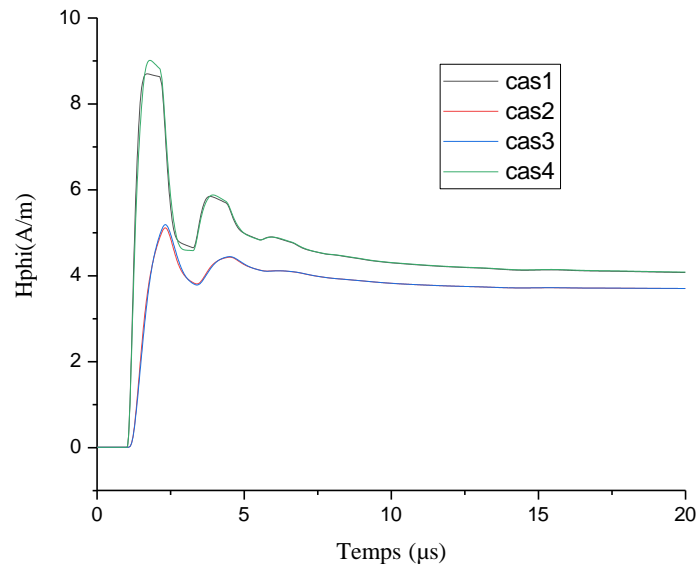


Figure. III.20. Le champ magnétique azimuthal à $r = 250\text{km}$ et $p = 1\text{m}$.

La présence de sol à faibles paramètres provoque une augmentation de l'amplitude du champ magnétique sous terre (voir cas 4 avec cas 2), même lorsqu'on ajoute juste une deuxième couche à faibles paramètres, on peut constater cette augmentation de la valeur crête du champ magnétique (voir cas 1 avec 2). Lorsque l'on ajoute une deuxième couche à paramètres élevés au domaine de propagation, le champ magnétique azimuthal peut être évaluée en considérant le sol homogène avec des paramètres électrique de cette dernière (voir cas 3 avec 2).

III 2.2. Coup de foudre tombant sur la tour CN (553m) :

Pour l'analyse de l'environnement électromagnétique de l'arc en retour initié à la tour CN, et en présence d'un sol stratifié verticalement, on a adopté la géométrie représentée sur la figure III.21. Le champ électromagnétique est calculé au-dessus du sol avec $h = 10\text{m}$, et en-dessous du sol avec une profondeur $p = 1\text{m}$ pour une seule distance radiale à savoir $r_1 = 198\text{m}$.

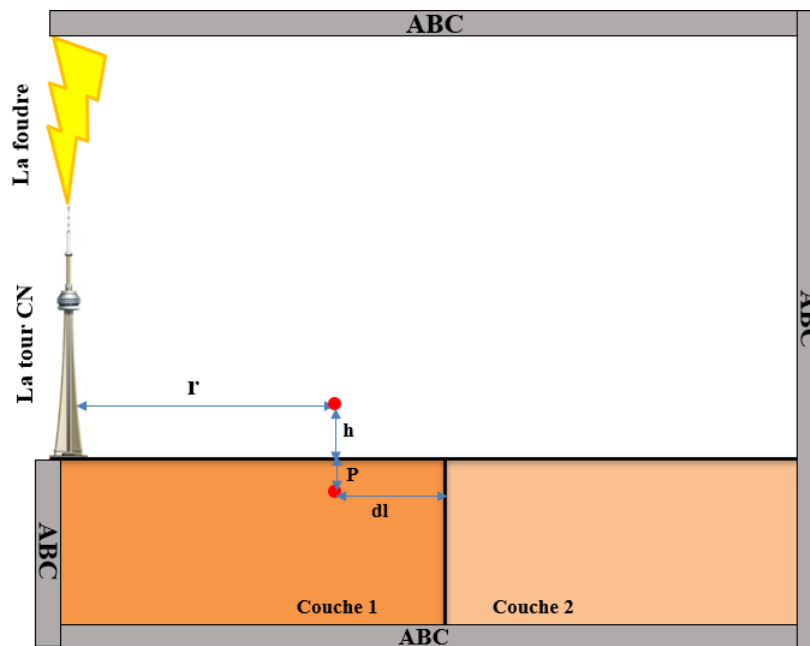


Figure III.21 : Géométrie de problème (la Tour CN)

Trois scénarios ont été inspectés dans l'analyse de l'effet de stratification verticale sur les rayonnements électromagnétiques d'un coup de foudre initié à la tour CN. Les cas 1 et 2 sont des cas élémentaires correspondant à une couche régulière (cas 01 sol homogène avec les paramètres suivants $\sigma=0,001\text{s/m}$ et $\epsilon_r=10$), et cas 2 le domaine de propagation est un lac avec les paramètres $\sigma=0,008\text{ s/m}$ et $\epsilon_r=81$). Alors que le cas 3 représente une configuration à deux couches (sol-lac), voir tableau.III.2.

Tableau III.2. Les paramètres électriques pour les 02 couches. [48]

	$\sigma_1(\text{s/m})$	ϵ_{r1}	$\sigma_2(\text{s/m})$	ϵ_{r2}
Cas 01 : sol homogène (faible conductivité- sol)	0.001	10	0.001	10
Cas 02 : domaine homogène (conductivité élevé- lac Ontario)	0.008	81	0.008	81
Cas 03 : domaine stratifié (sol-lac) ($\sigma_1 < \sigma_2$)	0.001	10	0.008	81

1) Champs électromagnétiques au-dessus du sol

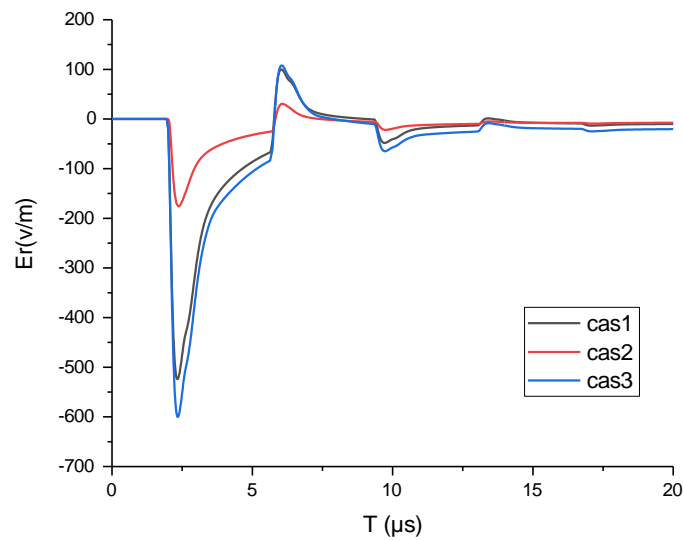


Figure III.22. Le champ électrique horizontal à $r = 198$ m et $h = 10$ m.

D'après la figure III.22, le champ électrique horizontal au-dessus du sol est affecté par les paramètres électrique de domaine de propagation (voir cas 01 et 02), ou chaque fois la conductivité augmente l'amplitude du champ diminue.

La stratification verticale affecte cette composante (voir cas 01, 02 et 03), l'ajoute d'une couche moins conductrice (cas 03) à un domaine de propagation avec des paramètres élevés (cas 02), engendre une augmentation dans l'amplitude du champ électrique horizontal.

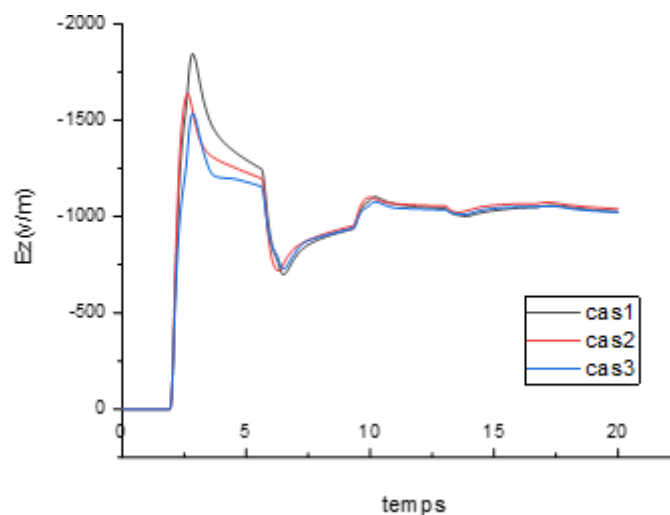


Figure III.23. Le champ électrique vertical à $r = 198$ m et $h = 10$ m.

D'après la Fig. III.23, les formes d'ondes du champ électrique vertical au-dessus du sol, ont un pc positif pour les 3 cas. On voit que la présence d'un domaine de propagation à paramètres élevés provoque une diminution de l'amplitude du champ électrique vertical.

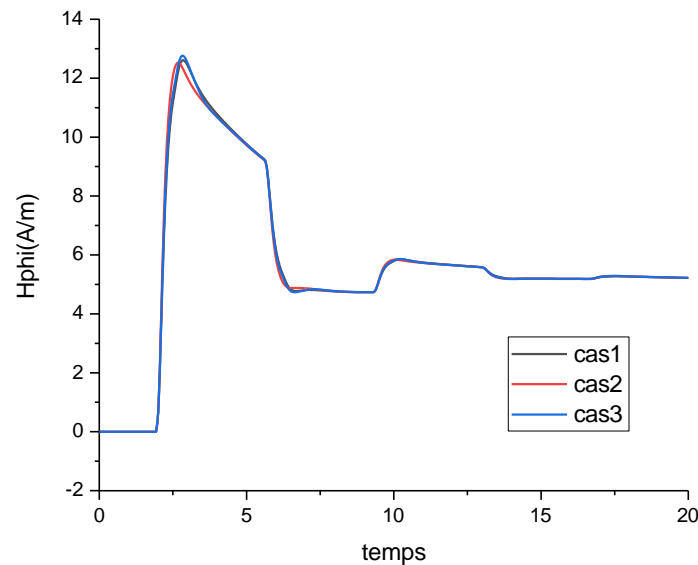


Figure. III.24. Le champ magnétique azimutal à $r = 198$ m et $h = 10$ m.

Le comportement des formes d'ondes du champ magnétique au-dessus du sol n'est pas affecté par les paramètres électriques du sol et par la stratification verticale. La composante azimutale peut être déterminée en considérant le domaine caractérisé uniquement par un sol homogène.

2) Champs électromagnétiques souterrains :

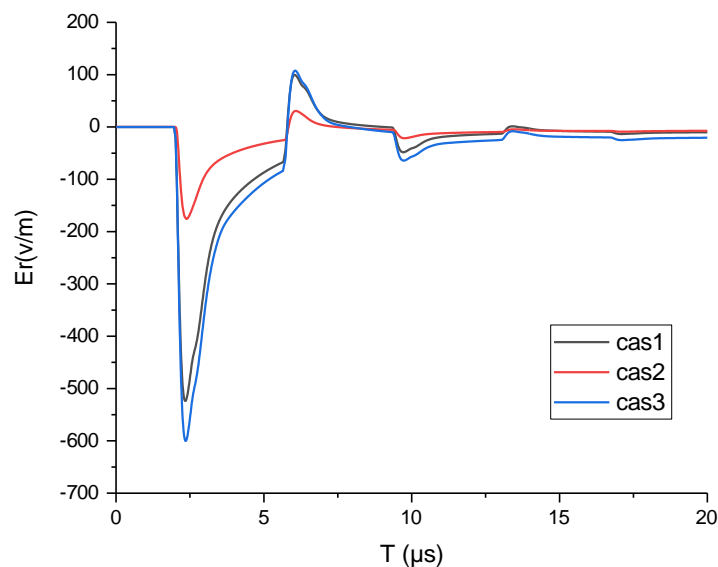


Figure III.25. Le champ électrique horizontal à $r = 198$ m et $p = 1$ m.

La Figure III.25 montre que la forme du champ électrique horizontal est affectée par les paramètres électriques du domaine de propagation et par la stratification verticale en

dessous du sol. L'amplitude de cette composante est inversement proportionnelle avec la conductivité électrique.

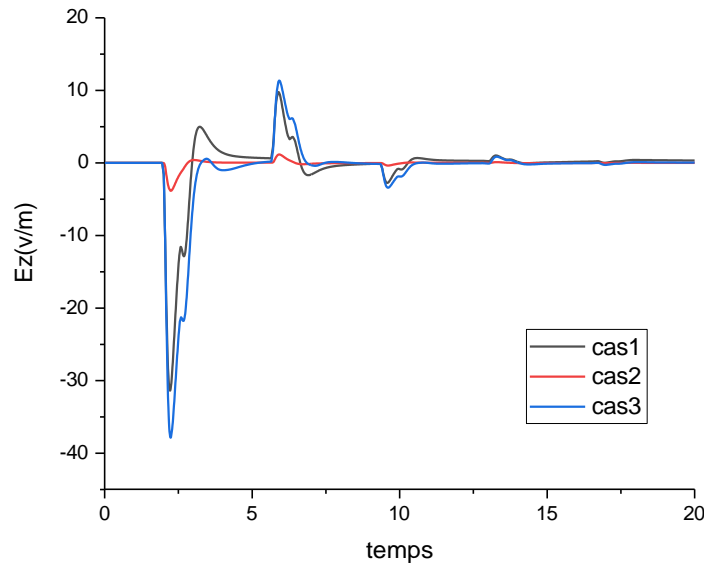


Figure III.26. Le champ électrique vertical à $r = 198\text{m}$ et $p = 1\text{m}$.

D'après la fig.III.26, le champ électrique vertical en dessous du sol est fortement affecté par la conductivité du domaine et aussi par la stratification verticale. Cette composante est caractérisée par une polarité bipolaire, l'amplitude diminue avec l'augmentation des paramètres électriques du domaine de propagation (cas 1, 2), la présence d'une couche avec des paramètres plus conducteurs génère une légère augmentation de l'amplitude de cette composante (voir cas 1 et 3).

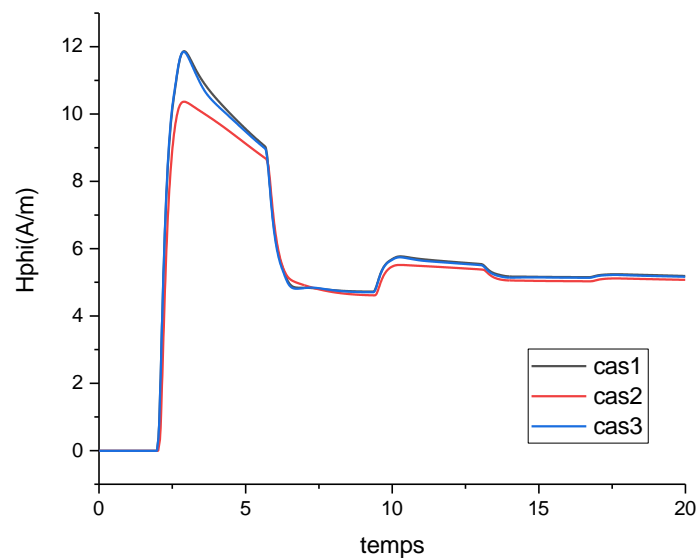


Figure III.27. Le champ magnétique azimutal à $r = 198\text{m}$ et $p = 1\text{m}$

La fig.III.27, présente le champ magnétique azimutal en dessous du sol pour les trois cas étudiés. On remarque que les paramètres électriques ont un effet sur cette composante (cas 01 et 02), mais l'effet de la stratification verticale peut être négligeable pour cette composante.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté et étudié l'effet de la stratification verticale (sol à deux couches) sur les champs électromagnétiques rayonnés par la foudre initiée à la tour Peissenberg de 168 mètres, et à la tour CN de 553m, au-dessus et en dessous du sol, en utilisant la méthode FDTD. Les champs électromagnétiques ont été simulés à des distances radiales $r = 150\text{m}$ ($dl = 50\text{m}$), $r = 198\text{m}$ ($dl = 2\text{m}$) et à $r = 250\text{m}$ ($dl = 50\text{m}$) de la base de la tour.

Nous avons utilisé la méthode des différences finies dans le domaine temporel, appelée FDTD, pour modéliser les composantes du champ électromagnétique. Pour la présentation du courant de foudre, le long de la tour et du canal de foudre, nous avons utilisé le modèle Baba et Rakov.

En présence d'un domaine de propagation stratifié, au-dessus du sol, les deux composantes du champ électrique sont affectées par les paramètres électriques du sol et affectées également par la stratification verticale du sol. On peut voir que la présence d'une deuxième couche avec des paramètres faibles provoque une augmentation de l'amplitude du champ par rapport au cas d'un sol homogène avec des paramètres élevés, et inversement, lorsque l'on ajoute une deuxième couche avec des paramètres élevés provoque une diminution de l'amplitude du champ par rapport au cas d'un sol homogène à faibles paramètres. Le champ magnétique azimutal au-dessus du sol n'est pas affecté par la stratification ou par la modification des paramètres électriques, cette composante peut être évaluée au-dessus du sol en utilisant l'approche du sol parfaitement conducteur.

En dessous du sol, le champ électrique horizontal rayonné par la foudre à la tour Peissenberg ou la tour CN, est affecté par les paramètres électriques du sol, l'amplitude de cette composante semble être également inversement proportionnelle à l'augmentation des paramètres électriques. La stratification verticale n'affecte pas le champ électrique horizontal. Cette composante en dessous du sol peut être déterminée en considérant le sol homogène avec les paramètres électriques de la couche où se situe le point d'observation. Le champ électrique vertical souterrain semble être plus affecté par les paramètres électriques et la stratification verticale du sol. La valeur crête de cette composante est inversement proportionnelle aux valeurs des paramètres électriques du sol.

La composante azimutale du champ magnétique, en dessous du sol, est affectée par la stratification verticale. La présence de sols à faibles paramètres provoque une augmentation de l'amplitude du champ magnétique. Lorsque nous ajoutons une deuxième couche avec des paramètres élevés, le champ magnétique azimutal peut être évalué en considérant le sol homogène avec les paramètres inférieurs de la première couche.

L'effet de la stratification verticale est d'autant plus important que nous approchons du point de jonction des deux couches.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de la mise en place d'une méthodologie de caractérisation des rayonnements électromagnétiques dans le but d'étudier les formes d'ondes du champ rayonné par la foudre initiée à une tour, en présence d'un sol stratifié verticalement. Ainsi, cette étude a pour objectif de permettre une meilleure caractérisation du champ, ainsi que l'illustration de l'influence de la stratification du sol sur le champ électromagnétique rayonné. Pour atteindre notre objectif, on utilise la méthode aux différences finies dans le domaine temporel aux points centrés FDTD, motivés par sa flexibilité et sa robustesse.

Après avoir rappelé dans le premier chapitre la théorie relative à la physique du phénomène de la foudre et aux différentes observations expérimentales qui s'y rattachent, nous avons présenté dans un deuxième chapitre une revue générale sur la modélisation du rayonnement électromagnétique associé à une décharge de foudre dans le but de mettre en évidence les modèles décrivant le courant dans le canal de foudre. Parmi quatre catégories de ces modèles, nous avons donné une importance particulière aux modèles d'ingénieur. Nous avons présenté dans ce même chapitre, les deux modèles utilisés par la communauté scientifique pour la modélisation du courant de foudre en présence des objets élevés. Afin de déterminer le champ électromagnétique rayonné par la foudre au-dessus et en dessous du sol caractérisé par une conductivité finie ou une stratification verticale.

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé la méthode FDTD dans la résolution des équations de Maxwell, et déterminer les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre. Les conclusions tirées de cette étude sont comme suit :

1. Pour les Coups de foudre tombant sur un sol homogène de conductivité finie :

En dessous du sol :

- ✓ Le champ électrique horizontal est caractérisé par une polarité négative. Il est fortement affecté par la conductivité du sol, son amplitude est inversement proportionnelle avec la valeur de la conductivité. Le champ électrique vertical est caractérisé par une polarité bipolaire, son amplitude est aussi inversement proportionnelle avec la conductivité du sol. Le champ magnétique azimutal est caractérisé par une polarité positive, il est moins affecté par la conductivité du sol comparé aux deux autres composantes du champ électromagnétique, l'amplitude est inversement proportionnelle avec la valeur de la conductivité.

Au-dessus du sol :

- ✓ Les trois composantes du champ électromagnétique sont caractérisées par une polarité positive. La conductivité du sol n'affecte que la composante

Conclusion générale

horizontale du champ électrique ce qui confirme que l'hypothèse du sol parfait est une bonne approximation pour la composante verticale du champ électrique et la composante azimutale du champ magnétique. L'amplitude du champ radial est relativement proportionnelle avec la valeur de la conductivité du sol, ce qui est en contradiction par rapport au comportement de ce champ en dessous du sol.

2. *Pour les Coups de foudre tombant sur une tour en présence d'un sol homogène :*

- ✓ Les trois composantes du champ électromagnétique sont affectées par les réflexions multiples du courant aux extrémités de la tour et par la conductivité électrique du sol. Exception faite pour la composante azimutale du champ magnétique au-dessus du sol et qui n'est pas affectée par la conductivité du sol.

3. *Pour les Coups de foudre tombant sur une tour en présence d'un sol stratifié verticalement :*

En dessous du sol :

- ✓ Le champ électrique horizontal rayonné par un coup de foudre initié à la tour, est affecté par les paramètres électriques du sol, l'amplitude de cette composante semble être également inversement proportionnelle à l'augmentation des paramètres électriques. La stratification verticale, souterraine, n'affecte pas le champ électrique horizontal. Cette composante sous le sol peut être déterminée en considérant le sol homogène avec les paramètres électriques de la couche où se situe le point d'observation.
- ✓ Le champ électrique vertical souterrain, semble être plus affecté par les paramètres électriques et la stratification verticale du sol. La valeur d'amplitude de cette composante est inversement proportionnelle aux valeurs des paramètres électriques du sol.
- ✓ La composante azimutale du champ magnétique, sous le sol, est affectée par la stratification verticale. La présence de sols à faibles paramètres provoque une augmentation de l'amplitude du champ magnétique. Lorsque nous ajoutons une deuxième couche avec des paramètres élevés, le champ magnétique azimutal peut être évalué en considérant le sol homogène avec les faibles paramètres de la première couche.
- ✓ L'effet de la stratification verticale est d'autant plus important que nous approchons du point de jonction entre les deux couches.

Conclusion générale

Au-dessus du sol :

- ✓ Les deux composantes du champ électrique sont affectées par les paramètres électriques du sol et également moins affectées par la stratification verticale du sol.
- ✓ On peut voir que la présence d'une deuxième couche avec des paramètres faibles provoque une augmentation de l'amplitude du champ par rapport au cas d'un sol homogène avec des paramètres élevés, et inversement, lorsque l'on ajoute une deuxième couche avec des paramètres élevés provoque une diminution de l'amplitude du champ par rapport au cas d'un sol homogène à faibles paramètres.
- ✓ Le champ magnétique azimutal au-dessus du sol n'est pas affecté par la stratification ou par la modification des paramètres électriques, cette composante peut être évaluée au-dessus du sol en utilisant l'approche du sol parfaitement conducteur.
- ✓ L'hypothèse d'un sol homogène et/ou la négligence de la présence des objets élevés peut entraîner des erreurs dans le calcul du champ électromagnétique et par conséquent des erreurs dans l'estimation des courants et tensions induits dus aux phénomènes du couplage champ-structure (exemple : couplage champ-ligne de transmission aérienne, couplage champ-câble souterrain).
- ✓ Comme le cas en dessous du sol, l'effet de la stratification verticale est d'autant plus important que nous approchons du point de jonction entre les deux couches.

Listes des références

- [1] <https://www.parkergas.com/2021/08/23/storm-safety>
- [2] C.Gary « la foudre des mythologies antiques a la recherche moderne ». Edition Masson, 1994.
- [3] : Georges Le Roy, Claude Gary, Bernard Hutzler, Jacques Lalot, Christian Dubanton : « Les propriétés diélectrique de l'aire et les très hautes tensions », éditions Eyrolles 1984
- [4] : INERIS « Le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement », direction des risques accidentels septembre 2001.
- [5] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," *Electra*, vol. 41, pp. 23–37, 1975.
- [6] J. Schoene, M.A. Uman, V. A. Rakov, K. J. Rambo, J. Jerauld, C. T. Mata, A. G. Mata, D. M. Jordan, and G. H. Schnetzer, "Characterization of return stroke currents in rockettriggered lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 114, D03106, 2009. DOI: 10.1029/2008JD009873. [
- [7] J. Schoene, M. A. Uman, V. A. Rakov, V. Kodali, K. J. Rambo, and G. H. Schnetzer, "Statistical characteristics of the electric and magnetic fields and their time derivatives 15 m and 30 m from triggered lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 108, no. D6, 4192, 2003. DOI: 10.1029/2002JD002698.
- [8] V. A. Rakov, M. A. Uman, K. J. Rambo, M. I. Fernandez, R. J. Fisher, G. H. Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J. P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P. Laroche, and A. Bondiou-Clergerie, "New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama," *J. Geophys. Res.*, vol. 103, pp. 14117– 14130, 1998.
- [9] A. Mimouni, "analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre" thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf. 2007
- [10] Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman, "The physics of lightning".Science Direct. Physics Reports 534 (2014) 147–241.
- [11] V. A. Rakov, "Fundamentals of Lightning", Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2016
- [12] V.A Rakov,.., "Lightning Discharges Triggered Using Rocket-and-Wire Techniques", in Recent Research Development on Geophysics, edited by R. Signpost, pp. 141-171, India, 1999.
- [13] Uman, M. A., "The lightning discharge", 377 pp., Academic Press, London, UK. 1987
- [14] V. A. Rakov and M. A. Uman, "Lightning: Physics and Effects". Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
- [15] Heidler, F., J. Wiesinger, and W. Zischank, "Lightning Currents Measured at a Telecommunication Tower from 1992 to 1998", in 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 6, Zurich, Switzerland, 2001.
- [16] Hussein, A.M., W. Janischewskyj, J.S. Chang, V. Shostak, W.A. Chisholm, P. Dzurevych, and Z.I. Kawasaki, "Simultaneous measurement of lightning parameters for

Listes des références

strokes to the Toronto Canadian National Tower”, Journal of Geophysical Research, 100 (D5), 8853-61, 1995

[17] Janischewskyj, W., A.M. Hussein, V. Shostak, I. Rusan, J.X. Li, and J.S. Chang, “Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower (1978-1995)”, IEEE Transactions on Power Delivery, 12 (3), 1210-1221, 1997.

[18] Y. T. Lin, M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider, and C. D. Weidman “Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two station measurements”, Journal Of Geophysical Research, 84 (C10), pp. 6307-6314,1979.

[19] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz et C. Mazzetti, “Lightning Return Stroke Current Models With Specified Channel-Base Current : A Review and Comparison”, Journal Of Geophysical Research, Vol. 95, No. D12, Pages 20,395-20,408, November 20, 1990.

[20] <https://cdafal95.fr/7-infos-sur-le-reseau-electrique/>

[21] <https://www.infoclimat.fr/photolive-photos-meteo-257424-foudre-sur-eolienne.html>

[22] <https://www.chasseurs-orages.com/2020/05/analyse-du-foudroiement-de-la-ligne-tht-la-rochelle-fontenay-le-comte-le-10-mai-2020/>

[23] M. Chehada « Couplage électromagnétique d’une onde de foudre avec une ligne de transport d’énergie », Mémoire de Master, Université d’Oum El Bouaghi, Algérie, 2015.

[24] F. Heidler, ‘Travelling current source model for LEMP calculation’, Proceedings of 6th international symposium on EMC, Zurich, Switzerland, 29F2, 157–162, 1985.

[25] F. Rachidi, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, C. A. Nucci, S. Guerrieri, B. Kordi, and J. S. Chang, “Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers,” IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 43, no. 3, pp. 356–367, Aug. 2001.

[26] K. Arzag « Couplage des perturbations électromagnétiques rayonnées par un coup de foudre avec des lignes électriques» Mémoire de magister, USTO-MB, Oran, Algérie 2008

[27] D. Orzan « Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de ligne multifilaires » Thèse doctorat es science, EPFL, Lausan, Suisse, 1998

[28] K. Arzag « Calcul du champ électromagnétique rayonné par la un coup de foudre à l’aide de la méthode FDTD en trois dimensions» Thèse de Doctorat en sciences, USTO-MB, Oran, 2017

[29] E. Petrache « Lightning electromagnetic coupling to overhead transmission line networks and to buried cables» Thèse doctorat es science, EPFL, Lausan, Suisse, 2004

Listes des références

- [30] H.K. Hoidal « Analytical formulation of lightning induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground » IEEE Trans. On EMC, vol.45, No.1, fev.2003
- [31] F. Rachidi « Indirect Estimation of Lightning Currents from Remote Electromagnetic Field Measurements », IX International Symposium on Lightning Protection. 26th-30th November 2007; Brazil
- [32] A. Mimouni « Analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre », Thèse de Doctorat USTOMB 2007.
- [33] M.Omari « Etude de l'environnement électromagnétique de la foudre », Thèse de Doctorat UIK, Tiaret, 2018.
- [34] Nucci, C. A., C. Mazzetti, F. Rachidi, and M. Ianoz, "On lightning return stroke models for LEMP calculations", paper presented at 19th international conference on lightning protection, Graz, May 1988.
- [35] F. Rachidi and C. A. Nucci, "On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models," J. Geophys. Res., vol. 95, pp. 20389–20394, 1990.
- [36] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J.L. Bermudez, "Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel," J. Geophys. Res, 107 (D23) (2002) 4699.
- [37] Y. Baba, V. A. Rakov, "On The use of lumped sources in lightning returns stroke models". Journal Of Geophysical research, Vol.110, D03101, doi:10.1029/2004JD005202, Florida, USA, 2005.
- [38] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci and J. L. Bermudez « Effect of Vertically Extended Strike on the Distribution of Current along the lightning Channel », Journal of Geophysical Research, Vol. 107, n° D23. 4699. 7 December 2002.
- [39] J.L. Bermudez, "lightning current and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects", these N° 2741 (2003), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [40] Mohamed Lotfi KHENE, " Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis", mémoire de magister, Spécialité électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [41] S. A. Mosaddeghi, A. Mimouni, F. Rachidi, M. Rubinstein, G. Diendorfer, H. Pichler, D. Pavanello. « Vertical and Horizontal Components of the Electric Field Associated with Lightning Strikes to the Gaisberg Tower », COST P18: The Physics of Lightning Flash and Effects. Vienna, May 25-27, 2009

Listes des références

- [42] K. S. Yee, « Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media », IEEE Trans Antennas Propagate, vol. 14, p. 302-307, 1966.
- [43] Cooray, V., Underground electromagnetic fields generated by the return strokes of lightning flashes, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Vol. 43, N°. 1, pp. 75-84, 2001.
- [44] G. Mur, « Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations », IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 23, no 4, p. 377-382, 1981.
- [45] G. Zheng, A. A. Kishk, A. W. Glisson, and A. B. Yakovlev « Implementation of MUR'S absorbing boundaries with periodic structures to speed up the design process using finite-difference time-domain method » Progress in Electromagnetics Research, PIER 58, 101–114, 2006.
- [46] A. Mimouni, “analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre” thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf. 2007
- [47] M. OMARI , I. GHLIB, « Computation of Electromagnetic Fields of Lightning Initiated to Peissenberg Tower in the Presence of Vertical Stratified Two Layer Ground », The 12th National Conference on High Voltage Engineering (CNHT), October 04–06, 2022.
- [48] O. Mohamed ,Gh .Imane « The vertical stratification (mixed propagation path:land-lake) effect on the electromagnetic fields of lightning initiated to the CN tower », The 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Costantine,oct-2022.

